**Deutscher Bundestag** **Drucksache 18/7216**
**18. Wahlperiode** 07.01.2016

# Bericht

## des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

## Technikfolgenabschätzung (TA)

## Synthetische Biologie – die nächste Stufe der Bio- und Gentechnologie

Inhaltsverzeichnis

Seite

Seite

**Vorwort des Ausschusses**

Molekularbiologische Forschungserkenntnisse bilden wichtige Grundlagen für Innovationen in der Medizin, der Pflanzen- und Tierzucht der bio-basierten Chemie- und Energieproduktion sowie im Umweltschutz. Seit einigen Jahren werden mit dem Begriff Synthetische Biologie Forschungsvorhaben, Methoden und Verfahren zu einem »Umbau« natürlicher Organismen bezeichnet, dessen Ziele bis hin zur Schaffung (kompletter) künstlicher »biologischer« Systeme reichen. Die Abschätzung der wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und ökologischen Potenziale der Synthetischen Biologie ist ein hochrelevantes Unterfangen, um Innovationschancen, aber auch mögliche Risiken frühzeitig erkennen zu können. Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung hat daher das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) mit einer Untersuchung zur Synthetischen Biologie beauftragt, die sich neben naturwissenschaftlich-technologischen Aspekten insbesondere mit Fragen der Sicherheit (Biosafety und Biosecurity), des geistigen Eigentums, der Regulierung und Governance, der öffentlichen Wahrnehmung sowie einer adäquaten und frühzeitigen Chancen- und Risikokommunikation befassen sollte.

Auch von anderen politischen Beratungsgremien, Ethikkommissionen, Akademien und Förderorganisationen ist in den vergangenen Jahren eine große Zahl an Studien und Stellungnahmen erschienen. Alle diese Analysen mussten mit dem Problem umgehen, dass es keine stringente, wissenschaftlich anerkannte Abgrenzung gegenüber der Gentechnologie gibt. Dies erschwert Untersuchung und Diskussion der möglichen Folgen sehr. Der Bericht des TAB reduziert dieses Problem, indem er eine Unterscheidung zwischen Synthetischer Biologie im engeren und im weiteren Sinn einführt und für die Folgenanalyse verwendet. Er arbeitet klar heraus, dass die praktische Nutzung der Synthetischen Biologie im engeren Sinne, also vom Menschen von Grund auf »designter« künstlicher biologischer Systeme, noch in weiter Ferne liegt und daher in den kommenden Jahren wenig gesellschaftliche und politische Relevanz entfalten dürfte.

Ganz anders ist dies bei der Synthetischen Biologie im weiteren Sinne – verstanden als nächste Stufe der Bio- bzw. Gentechnologie. Durch die wachsenden, zunehmend einfachen und schnelleren Möglichkeiten der gezielten molekularbiologischen Veränderung bekannter Organismen ist in den nächsten Jahren mit einer großen Zahl von Anwendungen zu rechnen. Nachdem sich die Vorhaben der Synthetischen Biologie in der Vergangenheit vorrangig auf die Veränderung von Mikroorganismen für die industrielle und medizinische Nutzung gerichtet haben, sind in jüngster Zeit die Anwendungen neuer Genveränderungstechnologien auch bei Pflanzen und Tieren und sogar dem Menschen in den Fokus der wissenschaftlichen und regulativen Debatte gerückt.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem TAB-Bericht eine hoch-aktuelle und substanzielle Informationsbasis für die weitere Befassung mit diesem wichtigen Themenfeld der Forschungs-, Umwelt- und Innovationspolitik.

Berlin, den 3 Juli 2015

**Patricia Lips**
Vorsitzende

| | | |
|---|---|---|
| **Dr. Philipp Lengsfeld**<br>Berichterstatter | **René Röspel**<br>Berichterstatter | **Ralph Lenkert**<br>Berichterstatter |

**Harald Ebner**
Berichterstatter

Arnold Sauter
Steffen Albrecht
Davy van Doren
Harald König
Thomas Reiß
Rüdiger Trojok

unter Mitarbeit von
Sebastian Elsbach

# Synthetische Biologie – die nächste Stufe der Bio- und Gentechnologie

Endbericht zum TA-Projekt

**TAB-ARBEITSBERICHT NR. 164**

Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag (TAB)
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Fon: +49 30 28491-0
Fax: +49 30 28491-119
buero@tab-beim-bundestag.de
www.tab-beim-bundestag.de

2015

# ZUSAMMENFASSUNG

Seit gut zehn Jahren werden mit dem Begriff »Synthetische Biologie« (kurz Synbio) Forschungsvorhaben, Methoden und Verfahren zu einem »Umbau natürlicher Organismen« bezeichnet, der weiter geht, als es bislang mithilfe der Gentechnik möglich war. Die Ansätze reichen bis hin zur Schaffung (kompletter) künstlicher »biologischer« Systeme. Die kurz- und mittelfristige Bedeutung wie auch das längerfristige Potenzial des sehr heterogenen Feldes werden innerhalb von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik durchaus unterschiedlich eingeschätzt, was auch an der nach wie vor fehlenden stringenten Definition liegt. Eine solche wäre für eine differenzierte Untersuchung der möglichen Folgen aber unabdingbar. Insbesondere eine wissenschaftlich sinnvolle, auch für Laien leicht nachvollziehbare Abgrenzung gegenüber der Gentechnologie ist bislang keinem der vielen Gremien gelungen, die sich daran versucht haben. Dass das Thema trotz sporadischer medialer Berichterstattung kaum in der Gesellschaft angekommen ist, kann daher nicht verwundern.

Im TAB-Bericht wird eine Basisunterscheidung von Synbio im engeren und Synbio im weiteren Sinn vorgenommen und für die Folgenanalyse und -debatte benutzt:

> Mit *Synbio i. e. S.* wird die Herstellung von »am Reißbrett« entworfenen und de novo konstruierten Zellen oder Organismen (oder auch von zellfreien biologischen bzw. biochemischen Systemen) bezeichnet. Diese sollen zur Produktion beliebiger, auch völlig neuartiger Substanzen oder visionärer Anwendungen im Gesundheits-, Energie- oder Umweltbereich dienen. Charakteristische Forschungsansätze und -methoden sind die Herstellung kompletter synthetischer Genome, die Konstruktion sogenannter »Minimalzellen« (entweder »top down« durch Reduktion natürlicher Zellen oder aber »bottom up« bzw. »from the scratch« aus biochemischen Grundbestandteilen) sowie der Einsatz von nichtnatürlichen Molekülen (»Xenobiologie«). Synthetische Biologie im engeren Sinn wird von einer eher kleinen Zahl von Wissenschaftlern vorangetrieben und soll auch zu Erkenntnissen über die Entstehung von Leben (und dessen Chemie) auf der Erde beitragen.

> *Synbio i. w. S.* bezeichnet demgegenüber als Sammelbegriff alle aktuell verfolgten, zunehmend informationsbasierten und meist anwendungsorientierten Ansätze der molekularbiologischen Veränderung bekannter Organismen. Diese zielen auf die Konstruktion neuer Synthesewege zur Herstellung von Chemikalien oder das Design genetischer Schaltkreise für neue sensorische und regulatorische Funktionen in existierenden Organismen. Synbio i. w. S. geht über bisherige einfache gentechnische Ansätze zur Stoffwechselbeeinflussung von Organismen (das sogenannte »Metabolic Engineering«) hinaus. Zunehmend werden dabei computergestützte Design- und Modellierungsprozesse eingesetzt.

In der Perspektive der vorliegenden Untersuchung gehören zur Synbio i. w. S. auch die Genome-Editing-Verfahren, die bisher noch kaum unter dem Label Synbio behandelt wurden. Ihre stürmische Entwicklung und die mögliche Anwendung an Pflanzen, Tieren und auch Menschen haben im Frühjahr 2015 den Anstoß zu einer Intensivierung der Gentechnikdebatte auf internationaler wie nationaler Ebene geliefert, der auch die Synbio als Forschungsbereich und Fördergegenstand einschließen wird.

### AUFTRAG UND SCHWERPUNKTSETZUNG DER UNTERSUCHUNG

Die Untersuchung des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), die im Auftrag des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (ABFTA) im Frühjahr 2011 begonnen wurde, sollte sich neben naturwissenschaftlich-technologischen Aspekten insbesondere auf Fragen der Ethik, der Sicherheit (Biosafety und Biosecurity), des geistigen Eigentums, der Regulierung (bzw. Governance), der öffentlichen Wahrnehmung sowie einer adäquaten und frühzeitigen Chancen- und Risikokommunikation richten. Im Laufe des Projekts wurde mit Blick auf den primären Auftrag des TAB, den Deutschen Bundestag zu beraten, folgender Zuschnitt gewählt:

- keine zu akademische Betrachtung der Frage nach dem Wesen der Synbio;
- keine vertiefte Darstellung überwiegend spekulativer Visionen bzw. Szenarien zukünftiger Anwendungen und Folgen der Synbio;
- stattdessen eine möglichst umfassende Einordnung der Debatten über die Potenziale und Perspektiven der Synbio in größere wissenschafts-, forschungs- und innovationspolitische Kontexte –
- mit dem Ziel der Herausarbeitung und Charakterisierung wichtiger verbundener, zukunftsrelevanter Themen und Handlungsfelder für Bundestag und speziell den ABFTA.

Hieraus resultierten die fünf Hauptkapitel des Berichts: Stand von Forschung, Entwicklung und Anwendung (Kap. III), Sicherheitsfragen der Synthetischen Biologie (Kap. IV), öffentlicher Diskurs als Governanceperspektive der Synbio (Kap. V), Akteure und Perspektiven der DIY-Bio(techno)logie (Kap. VI) sowie Zukunftsfragen und Handlungsfelder (Kap. VII).

## STAND VON FORSCHUNG, ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG

Viele Forschungs- und Entwicklungsansätze der Synbio richten sich auf die Nutzung nachwachsender anstelle fossiler Rohstoffe in der Chemie- und Energieproduktion und damit auf Kernbereiche einer zukünftigen »Bioökonomie«. Hinzu kommen vielfältige Ansätze in der Medizin sowie im Bereich der Umweltsensorik und -sanierung. Das Ziel ist jeweils, mithilfe der Synbio einige der biologischen Prozessen innewohnenden Begrenzungen zu überwinden bzw. zumindest auszudehnen.

### CHEMISCHE PRODUKTION UND ENERGIEGEWINNUNG

Im Labormaßstab wurde mittlerweile eine ganze Reihe neuer biobasierter Produktionswege für chemische Substanzen mithilfe der Synbio i. w. S. erfolgreich etabliert. Dabei werden typischerweise verschiedene Gene aus unterschiedlichen Organismen kombiniert und die vorhandenen Gene des Empfängerorganismus optimiert. Insbesondere höherpreisige Inhaltsstoffe (einschließlich Aroma- und Duftstoffe) für die Lebensmittel-, Kosmetik- und Reinigungsmittelindustrie werden so vermehrt hergestellt. In einigen Fällen werden solche neuen Produktionswege aber auch – zumindest im präkommerziellen Maßstab – für die Herstellung von wichtigen Grundchemikalien für die Kunststoffproduktion (1,3-Propandiol, 1,4-Butandiol) oder von biologisch abbaubaren Polymeren (Polylactide, Polyhydroxyalkanoate) genutzt.

Die Herstellung von 1,4-Butandiol mithilfe von Escherichia-coli-Stämmen stellt ein Beispiel hin zur Synbio i. e. S. dar: 1,4-Butandiol ist eine nichtnatürliche Chemikalie, die von keinem bekannten Organismus hergestellt wird; ihre »biobasierte« Herstellung erforderte deshalb einen Syntheseweg

ohne »natürliches« Vorbild. Der entsprechende Syntheseweg wurde auf der Basis von Kenntnissen über Stoffwechselwege und Enzymaktivitäten von E. coli und einer Reihe anderer Organismen in silico modelliert und damit weitgehend »rational designt«.

Im Energiebereich werden Ansätze der Synbio zur Modifikation von Stoffwechselwegen vor allem in Mikroorganismen (wie Hefen oder Mikroalgen) mit dem Ziel der Optimierung bzw. Neugestaltung der Rohstoffbereitstellung genutzt (u. a. zur Gewinnung von Butanol, Biodiesel und Farnesen). Bei der Rohstoffumwandlung richten sich die Bemühungen auf die Nutzung von Lignozellulose – dem Material, das den weitaus größten Teil der pflanzlichen Biomasse ausmacht und nicht essbar ist (z. B. Stängel und Blätter beim Mais) –, um so eine direkte Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion zu umgehen und gleichzeitig eine in großen Mengen vorhandene Rohstoffquelle zu erschließen.

**MEDIZIN**

Die Synthetische Biologie bietet eine Reihe von Ansätzen für neue Behandlungsstrategien sowie für neuartige Entwicklungs- und Produktionsverfahren für Pharmazeutika und Impfstoffe. Auch in der Diagnostik gibt es erste Beispiele für Anwendungsmöglichkeiten, wie einen Biosensor zum Ebolaerregernachweis, für den ein zellfreies System mit einem genetischen Schaltkreis entwickelt wurde. Während sich die meisten dieser Ansätze noch in frühen, präklinischen Forschungsphasen befinden, haben einige Verfahren das Stadium der klinischen Prüfung bzw. von großflächigen Freilandexperimenten oder der kommerziellen Produktion erreicht. Hierzu gehören modifizierte Viren zur Krebsbekämpfung, genetisch veränderte Stechmücken zur Kontrolle von Denguefieber sowie die Produktion des Pflanzenstoffes Artemisinin als wichtiger Bestandteil von Malariamedikamenten, basierend auf Mikroorganismen mit neu konstruierten Stoffwechselwegen.

**BIOSENSORIK UND BIOSANIERUNG**

Gentechnisch veränderte Mikroorganismen (GVMO) als zellbasierte Biosensoren können einfach und kostengünstig Messungen von toxischen Stoffen in Boden- oder Wasserproben erlauben. Ein erstes kommerziell verfügbares Produkt (das keine Freisetzung von GVMO erfordert) ist der ARSOlux Biosensor zur Bestimmung des Arsengehalts in Trinkwasser. Für die Sanierung kontaminierter Böden durch GVMO sind hingegen keine anwendungsreifen Entwicklungen bekannt. Eine Freisetzung wäre wohl unumgänglich, die Kontrolle der GVMO kaum vorstellbar. Hinzu kommt, dass für die Entfernung wichtiger Kontaminationen durch organische Substanzen (wie z. B. Erdöl) gut angepasste natürliche Mikroorganismen bzw. Konsortien von Mikroorganismen existieren.

**GESAMTEINSCHÄTZUNG**

Insgesamt kann bilanziert werden, dass der Entwicklungs- und Anwendungsstand der Synbio noch nicht sehr weit fortgeschritten ist und eine zukünftige Überlegenheit und ökonomische Durchsetzungsfähigkeit von Synbio-Ansätzen nicht ernsthaft abgeschätzt werden kann. Letzteres gilt insbesondere für die heute noch vorrangig visionären Nutzungsmöglichkeiten der Synbio i. e. S. Ob (mehr oder weniger komplett) künstliche Organismen bzw. »bioartige« Systeme jemals eine große Bedeutung für eine effiziente, zuverlässige und sichere »biobasierte« Produktion erlangen, ist nicht absehbar.

Auch Methoden und Verfahren der Synbio i. w. S. müssen sich gegenüber existierenden und anderen, ebenfalls in Entwicklung befindlichen Optionen durchsetzen. Einzelne Vorhaben und Produkte

sind bereits heute konkurrenzfähig, wobei es sich meist um kleinvolumige, aber hochpreisige Produkte handelt (Spezialchemikalien, Aromastoffe, Pharmaka, Impfstoffe). Bei diesen spielen weder Kostenfragen noch Biosicherheitsaspekte eine so große Rolle, weil auch die bisherigen bzw. alternativen Verfahren aufwendig sind und weil entweder in sichereren geschlossenen Systemen (Bioreaktoren) gearbeitet werden kann oder potenzielle Risiken/Nebenwirkungen eher in Kauf genommen werden (Pharmaka/Therapeutika). Nicht übersehen werden sollte, dass gerade die meistdiskutierten Produktbeispiele der Synbio, das Malariamedikament Artemisinin, der mithilfe veränderter Hefezellen produzierte Aromastoff Vanillin sowie ein Palmölersatz aus Mikroalgen, nicht sehr weit von »konventionellen« Gentechnikanwendungen »entfernt« sind.

In den vergangenen Jahren wurde der Nutzung der Synbio das größte Potenzial für die Herstellung von Massenchemikalien und für die Energieproduktion prognostiziert. Hierfür sprach, dass weltweit eine Reihe unternehmerischer Aktivitäten sowie massive Investitionen vor allem im Bioenergiebereich zu beobachten waren – die aber jüngst als Folge der schwankenden und insgesamt rückläufigen Ölpreisentwicklung stark zurückgefahren wurden. Sowohl im Grundchemikalien- als auch im Energie- und Kraftstoffbereich ist zu bedenken, dass es sich um Massenmärkte handelt, in denen sich neue Verfahren gegenüber seit Jahrzehnten etablierten und kostenoptimierten Technologien durchsetzen müssen. Wie langsam dies (zumindest bislang) geschieht, zeigt das Beispiel der Weißen bzw. industriellen Biotechnologie, also der Vorläufertechnologie der Synbio, deren Anteil an der chemischen (Grund-)Stoffproduktion sich in den vergangenen 25 Jahren nur zögerlich entwickelt hat. Die Vorzüglichkeit und Wettbewerbsfähigkeit neuer Produktionssysteme liegt zunehmend auch an der ökologischen bzw. Biosicherheitsbewertung. So stellt sich bei der Biokraftstoffproduktion mit gentechnisch optimierten Mikroalgen insbesondere die Frage, ob diese (aus ökonomischen Gründen) in großem Maßstab in (halb)offenen Wasserbecken kultiviert werden müssten oder inwieweit geschlossene Systeme (kombiniert mit kontinuierlichen Produktionsprozessen) genutzt werden könnten.

Die zukünftige Entwicklung der Synbio wird stark vom Engagement öffentlicher und privater Investoren abhängen, wobei deren Motive durchaus heterogen sind. Während für die öffentliche Forschungsförderung die Nachhaltigkeitsfrage im Vordergrund steht (bzw. stehen sollte), geht es für die Industrie vor allem um die Sicherstellung ihrer künftigen Geschäftsgrundlage. Trotz des jüngsten Ölpreisverfalls ist anzunehmen, dass diese Zielstellungen im Lauf der nächsten Jahre immer stärker in Richtung einer Wirtschaftsweise auf Basis nachwachsender und klimafreundlicherer Rohstoffe konvergieren (im Sinne einer Bioökonomie). Über die zu präferierenden Wege dorthin wird zwar nicht notwendigerweise Einigkeit herrschen, dennoch spricht diese gemeinsame Zielperspektive grundsätzlich für ein großes Potenzial aller biobasierten Produktionsstrategien. Dabei geht es aller Voraussicht nach – zumindest global gesehen – auf Dauer nicht um ein Ja oder Nein der Synbio-Nutzung, sondern um ein konkurrierendes Nebeneinander mit alternativen Verfahren zur intelligenten Nutzung der existierenden biologischen Vielfalt und ihrer immanenten Eigenschaften (z. B. im Sinne einer wissensintensiven Agrarökologie) – ähnlich, wie heute sowohl ökologische als auch konventionelle Landwirtschaft betrieben wird.

Die Erfolgsaussichten von Therapeutika, Impfstoffen und Gentherapieansätzen können erst recht nicht verallgemeinernd bewertet werden. Gerade in der Medizin zeigen sich die Wirksamkeit und relative Vorzüglichkeit oft erst in sehr späten Stadien der Entwicklung oder gar der Anwendung. Daher richtet sich die hauptsächliche Nutzen-Risiko-Debatte zu den Synbio-Anwendungen im Gesundheitsbereich derzeit auf andere Ebenen: auf die ökologischen Risiken beim Einsatz veränderter

Stechmückenpopulationen und auf Fragen der global sozialen Gerechtigkeit bei neuen Verfahren der Herstellung von Arzneimitteln und Impfstoffen.

Die Bedeutung der Synbio dürfte in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen je nach wirtschaftlichem Erfolg und gesellschaftlicher Akzeptanz ganz unterschiedlich ausfallen, analog zur Situation bei der »konventionellen« (Grünen, Roten und Weißen) Gentechnik. Eine Sonderstellung wird dabei der verbrauchersensible Bereich der Aroma- und Duftstoffe oder anderer Inhaltsstoffe für die Lebensmittel-, Kosmetik- und Reinigungsmittelindustrie einnehmen. Obwohl hier teils seit Langem gentechnologische Verfahren eingesetzt werden, dürfte die Anwendung von weiterentwickelten Synbio-Verfahren in diesem Bereich auch in Zukunft deutlich mehr öffentliche Aufmerksamkeit und Kritik erfahren, wie es im vergangenen Jahr bereits der Fall war.

## SICHERHEITSFRAGEN DER SYNTHETISCHEN BIOLOGIE

Fragen der biologischen Sicherheit haben die inner- und außerwissenschaftliche Debatte der Synbio von vornherein begleitet. Nachdem die meisten Produkte und Verfahren der Synbio am Anfang ihrer Entwicklung stehen, sind auch ihre möglichen sicherheitsrelevanten Eigenschaften wie Toxizität, Allergenität, Ausbreitungsverhalten oder Überlebensfähigkeit weitgehend unbekannt. In Verbindung mit der Diskussion über das Wesen und die Neuartigkeit der Synbio fokussiert die Sicherheitsdebatte zu »Biosafety« seit Längerem auf die politisch bedeutsame Frage bzw. Prüfung, ob die heutigen und absehbaren Entwicklungen (noch) unter die jetzigen Regulierungen (für Arzneimittel, neuartige Therapien, Medizinprodukte, Chemikalien und vor allem gentechnisch veränderte Organismen [GVO]) fallen bzw. von diesen angemessen erfasst werden – oder ob die Kategoriengrenzen gesprengt werden und bisherige Verfahren der Risikoabschätzung und des Risikomanagements nicht mehr (angemessen) greifen. Ein zweiter Themenkomplex betrifft Fragen der Biosecurity, d. h. des illegalen (Biocrime) oder auch böswilligen (Bioterror) Gebrauchs biologischer Agenzien bzw. des zugrundeliegenden Wissens. Auch wenn vieldiskutierte und umstrittene Experimente (v. a. mit Vogelgrippeviren), die mit der Gefahr eines solchen Missbrauchs in Zusammenhang gebracht wurden, bislang vorrangig nicht aus Forschungsvorhaben der Synbio kamen, so verbinden sich mit Szenarien einer zukünftigen Synthetischen Biologie doch weit reichende Befürchtungen und haben bereits zu ersten Regulierungsbemühungen geführt.

### BIOSAFETYFRAGEN – HERAUSFORDERUNGEN FÜR RISIKOABSCHÄTZUNG UND RISIKOREGULIERUNG

Ein aktueller Bedarf in Richtung einer Überarbeitung der Risikoregulierung für GVO in Deutschland bzw. Europa konkret mit Blick auf »synthetisch« veränderte Organismen (SVO) ist auch im Frühjahr 2015 nicht erkennbar. Aber angesichts der Dynamik der wissenschaftlich-technischen Entwicklung sowie der Regulierungsunterschiede in verschiedenen Weltregionen erscheint eine vorausschauende, intensivere Befassung mit der Risikoregulierung einer möglichen zukünftigen Freisetzung von SVO durchaus angezeigt.

Das zentrale Thema für die Risikoabschätzung und Risiko-Nutzen-Bewertung von zukünftigen SVO ist die Frage, wie eine Sicherheitsbewertung ohne substanzielle Äquivalenz zu einem vertrauten Ausgangsorganismus so durchgeführt werden müsste, dass das Ergebnis von Akteuren in Forschung, Industrie, Politik sowie von zivilgesellschaftlichen Organisationen und der Öffentlichkeit/Bürgern als Zulassungsgrundlage für eine Freilandanwendung akzeptiert werden könnte. Bei

Pflanzen stellt sich diese Frage ab einem größeren gentechnischen »Umbau«, bei Mikroorganismen im Grunde bei jeder Art von Freilandeinsatz (beispielsweise bei einer offenen Mikroalgenkultur zur Biokraftstoffproduktion), weil diese bislang fast ausschließlich in geschlossenen Systemen zum Einsatz gekommen sind. Ein hochbrisantes Thema könnten (in jüngster Zeit vermehrt als künftiger Therapieansatz erforschte) Eingriffe in die menschliche Darm- und sonstige Mikroflora werden, weil hier die Regelungszuständigkeiten unklar sind: Das deutsche Gentechnikgesetz (GenTG) bezieht sich nicht auf die Anwendung der Gentechnik am Menschen und damit wohl nicht auf die Bestandteile des menschlichen Mikrobioms, solange sich diese im menschlichen Körper befinden.

Ein weiteres Thema könnte die erneute Befassung mit den Sicherheitsanforderungen an Produktionsorganismen auch in geschlossenen Systemen (»contained use«) werden, insbesondere mit Blick auf mögliche »vollsynthetische«, weitgehend de novo konstruierte oder xenobiologisch massiv veränderte Organismen. Auch wenn sie noch weit von einer Anwendungsreife entfernt sind, wurden sie aufgrund ihrer fundamentalen biochemischen Unterschiede, die u. a. den funktionellen Genaustausch mit natürlichen Organismen unmöglich machen sollen, von einigen Wissenschaftlern Anfang 2015 verstärkt als vermeintlich besonders sichere zukünftige Option zur Diskussion gestellt.

Aller Voraussicht nach an Bedeutung gewinnen wird in den kommenden Jahren die Risikodebatte zu gentechnisch veränderten Insekten bzw. allgemein Tieren – insbesondere aufgrund der zunehmenden Möglichkeiten der Genome-Editing-Verfahren. Angesichts der Erfahrungen mit der Zulassung transgener Pflanzen erscheint eine konsensuale positive Risikobewertung gentechnischer Eingriffe in Tiere insbesondere mit einem hohen Verbreitungspotenzial wie Insekten in der EU sehr unwahrscheinlich.

**BIOSECURITY – SCHUTZ VOR MISSBRAUCH**

Zu einem bewussten Missbrauch biowissenschaftlicher Erkenntnisse können neben der gezielten Entwicklung, Herstellung und Weitergabe von biologischen Waffen/Kampstoffen durch reguläre Militäreinrichtungen oder aber terroristische Organisationen auch kriminelle Aktivitäten, beispielsweise zu Herstellung von Drogen, Dopingsubstanzen oder Arzneimittelfälschungen, gezählt werden. Über diese entweder geheim gehaltenen oder illegalen Aktivitäten ist naturgemäß kaum etwas bekannt, weshalb eine detaillierte, faktenbezogene Debatte zur Abschätzung der Gefahren von »Bioterror« und »Biocrime« (als Folge von Synbio-Aktivitäten, aber auch sonst) eigentlich nicht öffentlich geführt werden kann. Allerdings können grundsätzlich Fragen nach dem möglichen Missbrauch von Technologien, die sowohl zum gesellschaftlichen Wohl als auch bewusst für schädliche Zwecke genutzt werden können – sogenannte »Dual-Use-Technologien« – gestellt werden. Dabei geht es um zwei Ebenen: 1. die Generierung von heiklem Wissen – z. B. zur Synthetisierung und Produktion toxischer Substanzen, hochpathogener Viren oder resistenter bakterieller Krankheitserreger – und 2. der Zugang zu diesem Wissen sowie zu den Technologien bzw. Apparaten (Laborausstattung), die für die Realisierung notwendig sind.

Einer Kontrolle der unerwünschten Proliferation von Wissen und Technologien in den Biowissenschaften stehen insgesamt große technische, aber auch konzeptionelle, rechtliche und ethische Herausforderungen gegenüber. Letztere sind begründet in Fragen nach der Einschränkung der grundgesetzlich geschützten Forschungsfreiheit sowie konkreter, potenziell wichtiger Möglichkeiten für die Gesundheitsforschung und Gesundheitsvorsorge; aber auch in Fragen dazu, ob und wie Wissen selektiv an ausgewählte Gruppen weitergegeben werden kann und wer über dieses Wissen und die Auswahl der »Empfangsberechtigten« entscheiden könnte bzw. sollte. Es ist Konsens, dass neben

internationalen Waffenkontrollabkommen, gesetzlichen Exportbeschränkungen für Dual-Use-Güter und -Technologien sowie möglichen anderen gesetzlichen Regelungen zusätzliche Governancemaßnahmen erforderlich sind, um die Gefahr des Missbrauchs von biowissenschaftlicher Forschung im Allgemeinen und von Synthetischer Biologie im Besonderen zu verringern. Alle, die mit biologisch aktiven Substanzen arbeiten, sollten ein starkes Sicherheitsbewusstsein entwickeln und Kenntnisse haben, wen sie gegebenenfalls in die Bewertung der Gefährlichkeit ihrer Vorhaben miteinbeziehen können, ohne sich unangemessen überwacht fühlen zu müssen (wie dies in den USA der Fall sein kann, wo das Federal Bureau of Investigation [FBI] die präventive Kontrolle von Biosecuritygefahren gewährleisten möchte und u. a. für die DIY-Bioszene systematisch Verbindungsbeamte benannt hat).

In Deutschland wurde die Dual-Use-Problematik mit Blick auf besorgniserregende biosicherheitsrelevante Forschungsvorhaben (»Dual Use Research of Concern« [DURC]) in den vergangenen Jahren von Wissenschaftsorganisationen, Nichtregierungsorganisationen (NRO) und Politik engagiert aufgegriffen und intensiv diskutiert. In der Folge beauftragte die Bundesregierung den Deutschen Ethikrat mit der Erarbeitung einer Stellungnahme zum Thema »Biosicherheit – Freiheit und Verantwortung in der Wissenschaft«. Diese wurde im Mai 2014 vorgelegt und dürfte für die kommenden Jahre den Referenzpunkt für die weitere politische Behandlung des Themas in Deutschland bilden. Der Deutsche Ethikrat fordert eine gesetzliche Regelung für DURC. Kernpunkte der weiteren Empfehlungen sind die Erstellung eines bundesweit, d. h. für alle Arten von öffentlichen und privaten Forschungseinrichtungen, gültigen Forschungskodexes für einen verantwortlichen Umgang mit Biosecurityfragen sowie die Einrichtung einer zentralen, interdisziplinär zusammengesetzten DURC-Kommission, die alle Forscher vor der Durchführung von DURC-Projekten informieren müssen.

Mit Blick auf die konkrete Reduzierung von Missbrauchspotenzialen einer künftig deutlich leistungsstärkeren, billigeren und möglicherweise dezentralen Gen(om)synthese erscheint darüber hinaus eine Meldepflicht für »gensynthetisierende« Einrichtungen sowie eine Registrierung von DNA-Synthesizern als Option, die zumindest getestet werden könnte – auch wenn Biocrime- und Bioterrorrisiken wohl am ehesten von Akteuren aus Organisationen und Ländern resultieren, die sich gerade nicht durch (über)staatliche Vorschriften kontrollieren lassen.

## SYNBIO UND ÖFFENTLICHKEIT – VOM NICHTWISSEN ZUR MITGESTALTUNG

Die Forderung nach einem umfassenden gesellschaftlichen Dialog über Chancen und Risiken der Synbio als Element von »Good Governance« gehört seit Jahren zu den zentralen Empfehlungen nahezu aller Stellungnahmen von wissenschaftlichen oder politischen Gremien. In der Vergangenheit – so eine häufige Diagnose aus Wissenschaft und Politik – hatte eine systematische Debatte der gesellschaftlichen Folgen wissenschaftlich-technologischer Entwicklungen oft erst so spät eingesetzt, dass ethische Bedenken oder auch soziale Anforderungen an diese Entwicklungen nicht mehr adäquat berücksichtigt werden konnten. In der Folge kam es häufig zu einer breiten Ablehnung der bereits fertig entwickelten Produkte bzw. installierten Systeme (meist werden hierbei die Grüne Gentechnik und die Atomenergie angeführt). Als Reaktion darauf wurde in der Technikfolgenabschätzung (TA) ein gezieltes »upstream engagement« gefordert, d. h. eine möglichst systematische Befassung mit den gesellschaftlichen Potenzialen und Herausforderungen bereits in Frühstadien der Entwicklung. Die Synbio ist derzeit wohl *das* Paradebeispiel für dieses gezielte »upstream engage-

ment«. Sowohl auf EU-Ebene (im Forschungsförderungsprogramm Horizont 2020) als auch in Mitgliedsländern wurden zum Teil aufwendige öffentliche Diskursprozesse als neuartige Formen der Begleitforschung und der Governance von Forschung und Entwicklung (FuE) angestoßen.

**BERICHTERSTATTUNG, WAHRNEHMUNG UND STRATEGIEN ÖFFENTLICHER KOMMUNIKATION**

Der im Bericht enthaltene Überblick über die Darstellung der Synthetischen Biologie in den Printmedien sowie über den Wissensstand und Einstellungen der Bevölkerung zeigt beispielhaft die Herausforderungen, die bei der öffentlichen Kommunikation über Synbio durch das frühe Stadium entstehen: Es ist größtenteils unklar, wohin die Entwicklung geht und welche Produkte daraus entstehen werden. Die mediale Berichterstattung erfolgt nur sporadisch, meist anlässlich besonders gehypter Forschungserfolge (wie die Schaffung der »künstlichen Bakterienzelle Synthia« durch das Team von Craig Venter), deren zukünftige, realistische Bedeutung weitgehend unklar bleiben muss. Letztlich nimmt die breitere Öffentlichkeit die wissenschaftliche Entwicklung in diesem frühen Stadium daher kaum zur Kenntnis und müsste aktiv motiviert werden, sich damit auseinanderzusetzen. Bei der Synbio kommt dazu noch die Unklarheit der Definition, sodass verschiedene Akteure ganz unterschiedliche Verständnisse von dem Gegenstand haben, über den sie gemeinsam sprechen sollen. Dies erschwert Strategien bzw. Rahmungen bei der öffentlichen Kommunikation des Themas Synbio grundsätzlich.

**DISKURSFÖRDERUNG UND NEUE FORMEN DER GOVERNANCE DER SYNBIO**

Die laufenden, im Bericht vorgestellten Diskursaktivitäten in den Niederlanden, dem Vereinigten Königreich, in Deutschland und im Rahmen von EU-Projekten stellen Bemühungen dar, zumindest Teilöffentlichkeiten zu erreichen und eine Beteiligung der Gesellschaft im Sinn einer gemeinsamen, verantwortungsbasierten Entwicklung und Nutzung von Wissenschaft und Technologie zu ermöglichen. Sie repräsentieren ein Element der Forschungspolitik bzw. sind teilweise eng gekoppelt an konkrete forschungspolitische Programmatiken (sogenannte Roadmaps). Insbesondere von der EU-Kommission werden seit einigen Jahren unter dem Begriff »Responsible Research and Innovation« (RRI) systematische Reflexions- und Beteiligungsprozesse als neue Formen der Governance von FuE-Prozessen gefördert (zur Synbio spezifisch aktuell durch das SYNENERGENE-Projekt).

Ob daraus tatsächlich ein qualitativ neuer gesamtgesellschaftlicher Diskurs zur Entwicklung neuer Technologien im Allgemeinen und der Synbio im Speziellen resultieren kann, ist noch nicht ausgemacht, weil die RRI-Aktivitäten selbst als eine Art Experiment bzw. Lernprozess angesehen werden müssen. Die entsprechenden Projekte schließen sehr stark an (partizipative) TA-Aktivitäten als fast schon »klassische« Form der Begleitforschung an. Insbesondere ist unklar, inwiefern organisierte öffentliche Diskursaktivitäten tatsächlich eine Wirkung auf FuE-Prozesse der Synbio in öffentlichen und privaten Forschungseinrichtungen ausüben – und nicht nur in der Begleitforschung selbst.

Bei der weiteren Ausgestaltung von Diskursaktivitäten sollten realistische Ziele frühzeitig festgelegt und transparent kommuniziert werden. Insbesondere das Verständnis und die Qualität von Partizipation müssen dabei gut begründet sein, um Enttäuschungen bei den Beteiligten zu vermeiden. Der hohe Aufwand, der für anspruchsvolle Beteiligungsprojekte nötig ist, und die zwiespältigen Erfahrungen mit bisherigen Aktivitäten stehen einer Ausweitung der Angebote zur direkten Beteiligung allerdings entgegen. Stattdessen bietet es sich an, das Interesse der Bevölkerung für die Synbio allgemein und für die gesellschaftliche Einflussnahme auf ihre Entwicklung auf indirektem Weg zu

steigern. Dafür könnte der Wissenschaftsjournalismus gefördert und in seinem Bestreben nach einer qualitativ hochwertigen und professionellen Berichterstattung über Entwicklungen der Synbio (und sonstiger relevanter neuer Technologien) unterstützt werden. Außerdem könnten gesellschaftliche Akteure, insbesondere zivilgesellschaftliche Organisationen, aber auch DIY-Biologen durch geeignete Fördermaßnahmen in ihrer Rolle als Diskursakteure gestärkt werden.

## DIY-BIO(TECHNO)LOGIE – AKTEURE UND PERSPEKTIVEN

Während die forschungspolitische Förderung von öffentlichen Diskursaktivitäten zumindest ursprünglich aus einem Top-Down-Engagement resultiert, existiert mit der Do-it-yourself-Biologieszene eine Bottom-up-Bewegung, die per Definition eine aktive Beteiligung von Akteuren jenseits des üblichen Forschungs- und Innovationssystems darstellt. Diese heterogene Szene rekrutiert sich neben interessierten Laien und Bastlern insbesondere aus bildenden Künstlern sowie wissenschaftlich ausgebildeten Akteuren (mit Schwerpunkt aus den Bio- und Informationswissenschaften). Die Bedeutung der DIY-Bio- oder Biohackerszene für die Synbio resultiert allerdings bislang kaum aus der Entwicklung innovativer Projektideen oder gar konkreter Forschungsvorhaben, da die technischen Kapazitäten und Möglichkeiten meist noch sehr begrenzt sind. Es gibt aber mindestens drei wichtige Gründe dafür, das Phänomen im Kontext des Themas Synbio und damit dieses Berichts näher zu beleuchten:

> Zum Ersten könnte der technologische Rückstand spätestens dann schrumpfen bzw. in bestimmter Hinsicht geradezu verschwinden, wenn ein zentrales Ziel – bzw. die Vision – der Synbio i. e. S. Realität wird, nämlich die digitale Modellierung und automatisierte Produktion synthetischer Organismen.
> Zum Zweiten liefert die DIY-Biologie bereits jetzt Impulse für die Debatte über die Perspektiven der Synbio (i. w. S.), ihre gesellschaftliche Nützlichkeit und Erwünschtheit sowie insbesondere den Anspruch der Öffentlichkeit auf eine echte Teilhabe am Forschungs- und Innovationsprozess.
> Und zum Dritten wurden immer wieder Stimmen laut, welche die DIY-Biologie aufgrund von Sicherheitsbedenken als nichterwünschte Form der Citizen Science einordnen, auch wenn die Bedenken vor allem zu möglichen Biocrime- oder gar Bioterrorpotenzialen von den meisten Experten als übertrieben eingeschätzt werden.

### BISHERIGE ENTWICKLUNGEN

Hacken bedeutet, Gegenstände oder auch Ideen aus ihrem ursprünglichen Kontext herauszulösen und ihnen eine neue Funktion zu geben. In Industrieländern ist dies häufig ein künstlerischer, spielerischer Umgang mit Technologie, in Entwicklungsländern kann der Ansatz (hier Jugaad genannt) hingegen handfeste Problemlösungen im Alltag bieten. Eines der Kernanliegen der Biohacker ist es, Wissen, Material und Methoden der Lebenswissenschaften prinzipiell allen Menschen zugänglich zu machen.

Die erste Phase der DIY-Biologie reicht bis in die frühen 1990er Jahre zurück und wurde durch Aktivitäten einer kleinen Gruppe von Bioartkünstlern geprägt. Anfang der 2000er Jahre folgte eine Phase der »globalen Vernetzung«, während derer hauptsächlich Wissenschaftler und Studenten begannen, sich über das Internet auszutauschen. Um das Jahr 2008 herum entstanden dann weltweit in großen Ballungszentren der Industrie- und Schwellenländer zumeist gemeinnützig betriebene

Biohackerspaces als halböffentlich nutzbare Biolabore. Die dort durchgeführten Arbeiten haben Kunst, Bildung, Gesellschaftskritik, technologische Innovation und Zukunftsszenarien zum Thema. Sie bieten den Mitgliedern und Besuchern die Option, molekularbiologische Techniken in Eigenregie zu erlernen und anzuwenden, ohne von Schulen und Universitäten abhängig zu sein. Durch die zunehmende technologische Emanzipation der DIY-Bioszene und deren mediale Präsenz wurde eine kritische Auseinandersetzung zu gesellschaftlichen Fragen angeregt. Bestrebungen, eigene ethische Regeln in Form von »Codes of Ethics« einzuführen, sind aufgrund der Heterogenität der internationalen Biohackerszene bisher in ihrer Reichweite begrenzt.

In den letzten Jahren zeichnet sich eine zunehmende Kommerzialisierung ab, die zu mehreren Start-up-Gründungen führte. Einige der dabei angekündigten Entwicklungsprojekte, darunter zur Herstellung selbstleuchtender Pflanzen, haben sowohl unter gentechnikkritischen NRO als auch innerhalb der DIY-Bioszene heftige Kritik ausgelöst. Die Aktivitäten in der DIY-Bioszene riefen auch bei einigen Experten für Biosicherheit (v. a. in den USA) Befürchtungen hervor, Biohacker könnten durch Fehler (Bioerror) Umwelt oder Menschen schaden, wissentlich oder unwissentlich kriminelle Handlungen (Biocrime) oder sogar bioterroristische Aktivitäten durchführen. Die Befürchtungen wurden allerdings in den letzten Jahren nach genauerer Analyse der Situation stark relativiert.

**ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN UND -SZENARIEN**

Mit Blick auf eine zukünftig deutlich leistungsfähigere DIY-Biologie als Konsequenz weiterer technologischer Entwicklungen, vor allem der Automatisierung, Dezentralisierung, Miniaturisierung und Verbilligung der DNA-Synthese sowie von Lab-on-a-Chip-Technologien, werden in der DIY-Bioszene selbst zunehmend Fragen zu Biosicherheit und zur Freiheit der Forschung sowie zur gemeinwohlorientierten wirtschaftliche Nutzung gestellt. Im TAB-Bericht werden hierzu Überlegungen zu einem sogenannten »Bio-Commons-Konzept« vorgestellt, das in der europäischen Biohackerszene entworfen wurde. Dieses umfasst Überlegungen zur Notwendigkeit und den Möglichkeiten einer Erfassung und Kontrolle des Umgangs mit genetischen Daten, sowohl zur Vermeidung riskanter Anwendungen als auch zur Förderung einer möglichst offenen Verbreitung des (molekular)biologischen und (bio)technologischen Wissens als Basis einer zukünftigen global gerechten und nachhaltigen Nutzung der Potenziale der Synthetischen Biologie. Vorgeschlagen wird eine grundlegende Reform des Schutzes geistigen Eigentums in den Lebenswissenschaften, sodass Schutzansprüche unbürokratisch und kostengünstig für eine eher kurze Dauer (wenige Jahre) erworben und mit Share-Alike-Klauseln ähnlich zu den auf dem Copyright basierenden Creative-Commons-Lizenzen verbunden werden können. Zur Diskussion gestellt wird auch eine begrenzte Deregulierung von als sicher, d. h. als risikolos bewerteten Gensequenzen bzw. Organismen, in Anknüpfung an auch derzeit schon bestehende gesetzliche Spielräume (u. a. bei der Selbstklonierung) und Praktiken (im schulischen und universitären Bereich).

Die DIY-Bioszene könnte eine wichtige Rolle bei Vermittlung, Kritik und Erforschung möglicher gesellschaftlicher Folgen der Biowissenschaften einnehmen. Engagierte Bürger, Hackerspaces und offenere akademische Strukturen bieten eine Möglichkeit, anwendungsorientierte Forschung stärker für einen konkreten gesellschaftlichen Dialog zu öffnen.

## ZUKUNFTSFRAGEN UND HANDLUNGSFELDER

Den Ausgangspunkt für die Beschreibung der Handlungsfelder und -optionen bildet eine resümierende Betrachtung zur Frage des Neuigkeitswerts und der gesellschaftlichen Relevanz der Synbio sowie der politischen Zuständigkeiten. Selbst wenn Synbio i. e. S. auf längere Zeit wenig praktische Bedeutung erlangen dürfte – die Debatte über die Synbio i. w. S. (als Synonym für die nächste Stufe der Bio- und Gentechnologie) dürfte aufgrund der Genome-Editing-Methoden, die bislang meist nicht unter dem Label Synbio behandelt wurden, in Zukunft noch viel intensiver als in den vergangenen Jahren geführt werden. Einen neuen Akzent dürften hierbei die erweiterten Akteurskreise (wie die DIY-Bioszene, aber auch die Teilnehmer des iGEM-Studentenwettbewerbs) und die gewachsenen Ansprüche an gesellschaftlicher Beteiligung erlangen, die in den letzten Jahren entstanden sind. In der Gesamtschau der Ergebnisse des vorliegenden Berichts ergeben sich sechs Handlungsfelder bzw. Themenbereiche, vorrangig für die Forschungspolitik, teils auch für die Umwelt- und die Wirtschaftspolitik.

### GRUNDLAGEN- UND ANWENDUNGSBEZOGENE FÖRDERUNG VON FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

Die wichtigste Perspektive der öffentlichen FuE-Förderung sollte das Offenhalten bzw. Erweitern von Optionen sein, was eine zu starke oder vorzeitige Festlegung auf spezielle Technologien oder Verfahren verbietet – insbesondere angesichts einer so großen Herausforderung, wie sie das Erreichen einer globalen, nachhaltigen Bioökonomie darstellt. Während die kurz- und mittelfristigen Anwendungsmöglichkeiten aus der Synbio i. w. S. resultieren, ist das Zukunftspotenzial der Synbio i. e. S. kaum zu prognostizieren. Eine besondere Förderung der Erforschung und Entwicklung »vollsynthetischer« – oder zumindest xenobiologischer – Organismen über die Grundlagenforschung hinaus ist daher derzeit kaum begründbar. Der bisherige weitgehende Verzicht des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) auf die strategische Verwendung des Begriffs Synbio und die gleichzeitige vielfältige Förderung neuer Methoden der Bio- und Gentechnologie in unterschiedlichen Förderlinien erscheint angemessen, kompatibel zu dem offeneren Konzept einer Synbio i. w. S. und auch in Zukunft verfolgenswert.

Ein zweiter Orientierungspunkt für die Entwicklung von gesellschaftlich potenziell umstrittenen Technologien, wie sie die Synbio als nächste Stufe der Bio- und Gentechnologie repräsentiert, sollte mittlerweile fast selbstverständlich sein, wird aber nach wie vor zu oft ausgeblendet: weg von einer isolierten Betrachtung der Technologiepotenziale und hin zu einer umfassenden, problemlösungsorientierten Optionenprüfung. Hierbei ist dann die Beteiligung gesellschaftlicher Akteure außerhalb des Wissenschafts- bzw. klassischen Innovationssystems besonders wichtig, weil diese beispielsweise aus der Landwirtschaft oder der Gesundheitsversorgung Erfahrungs- und Alltagswissen einbringen können, das wissenschaftliche Analysen und Herangehensweisen alleine nicht bieten.

### PROSPEKTIVE BIOSICHERHEITSFORSCHUNG ALS BASIS ZUKÜNFTIGER RISIKOABSCHÄTZUNG UND -REGULIERUNG

Während sich einerseits die meisten internationalen Experten einig sind, dass die bestehenden Verfahren der Risikobewertung in den nächsten Jahren für den Umgang mit den Produkten der Synbio (i. w. S.) ausreichen, wird andererseits seit einigen Jahren schon darauf hingewiesen, dass das bisherige Verfahren, das auf einer Fall-für-Fall-Prüfung und auf einem Vergleich mit weitgehend ähnlichen (substanziell äquivalenten), seit Langem genutzten (vertrauten) Organismen basiert, durch

mehrere wissenschaftlich-technologische Entwicklungen der Synbio infrage gestellt wird. Hieraus resultiert die zentrale Frage, in welchem Umfang und mit welchen Methoden substanziell veränderte oder weitgehend »neukonstruierte«, vermehrungs- und ausbreitungsfähige Organismen charakterisiert werden können und müssen, um eine gesellschaftlich akzeptable Entscheidungsfindung über die Nutzung dieser Organismen herbeiführen zu können.

Anknüpfend an erste Untersuchungen der vergangenen Jahre zur Risikoabschätzung gentechnisch veränderte Pflanzen (GVP) mit substanziell geänderten Eigenschaften (z. B. hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung oder ihrer Trockenheits- und Salztoleranz) und angesichts der fortschreitenden Möglichkeiten der Synbio i. w. S., vor allem der Genome-Editing-Verfahren, erscheint es fast schon drängend, dass sich das BMBF – im Verbund mit den anderen betroffenen Fachministerien für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) – erneut der Biosicherheitsforschung zuwendet, nachdem diese seit 2012 nur noch im Rahmen europäischer Projekte gefördert worden ist. Die Brisanz von Fragen der Zulassung von GVO und der Biosicherheitsforschung als Basis zukünftiger Risikoabschätzung und -regulierung wird noch dadurch gesteigert, dass eine Reihe von Gentechnologieanwendungen von der Risikoregulierung und damit der Sicherheitsbewertung auch in der EU und Deutschland nicht (mehr) erfasst wird, weil die quantitativen Änderungen auf DNA-Ebene sehr gering sind, gleichzeitig aber durch Summierung zu substanziell veränderten GVO führen könnten.

Um eine forschungspolitische Programmatik für eine prospektive Biosicherheitsforschung zur Synbio i. w. S. entwickeln zu können, erscheint es unumgänglich, die bisherigen, ungelösten Kontroversen über die Risikobewertung von »konventionellen« GVO ein weiteres Mal aufzurollen und zu versuchen, die Schwachstellen bzw. Streitpunkte der Risikoforschung einer umfassenden und vor allem diskursiven Bilanzierung zu unterziehen. Dabei ist nicht zu erwarten, dass die Streitpunkte aufgelöst werden, sondern das Ziel sollte eine weiter gehende Verständigung der unterschiedlichen Akteure als bislang über die (nach wie vor) offenen Fragen der Biosicherheitsforschung zu GVO sein. Um die Erfolgschancen eines solchen Prozesses zu erhöhen, sollten Zielvorgaben so realistisch und konkret wie möglich formuliert und vor allem Negativerfahrungen und Einsichten aus früheren Verständigungsversuchen ausgewertet und berücksichtigt werden.

Da bei der Risikobewertung von GVO die (natur)wissenschaftlichen Aspekte nur einen Teil der relevanten Fragen abdecken, müsste ein zukünftiges Biosicherheitsprogramm von vornherein auch sozial-, geistes-, wirtschafts- und rechtswissenschaftlich ausgerichtet sein, langfristig und ressortübergreifend konzipiert, und dabei echte Beteiligungsmöglichkeiten für die Kompetenz und Interessen aller relevanten gesellschaftlichen Akteure bieten. Die Koordination eines entsprechenden Prozesses zur Erarbeitung eines Forschungsprogramms müsste durch eine Institution bzw. ein (Lenkungs-)Gremium erfolgen, die/das von so vielen Beteiligten wie möglich als neutral und fair eingeschätzt wird.

Ein wichtiger Punkt wird die Finanzierung sein. Ob die Privatwirtschaft in Form von Industrieverbänden, Versicherungsunternehmen oder Investorennetzwerken in einen entsprechenden Fonds einzahlen würde bzw. sollte, wäre zu eruieren. Ein erster konkreter Schritt könnte die Organisation einer Sondierungskonferenz durch die zuständigen Ministerien bereits unter stärkerer Beteiligung der relevanten gesellschaftlichen Gruppen sein.

**BETEILIGUNG VON STAKEHOLDERN UND DER BREITEREN ÖFFENTLICHKEIT BEI DER AUSGESTALTUNG VON FORSCHUNGSAGENDEN ZUR SYNBIO**

Die Beteiligung gesellschaftlicher Akteure außerhalb des (traditionellen) Wissenschaftssystems an der Ausrichtung von Forschungsrichtungen und Forschungsagenden wird zunehmend zum Element der europäischen und deutschen Forschungspolitik. Sowohl im Bereich der nutzen- bzw. optionenorientierten Forschungsförderung als auch mit Blick auf künftige Förderprogramme zur Risiko- bzw. Sicherheitsforschung der Synbio ist die Einbindung von Vertretern (kritischer) zivilgesellschaftlicher Organisationen von besonderer Bedeutung.

Während es für die großen Wissenschaftsorganisationen und -einrichtungen, darunter die Akademien, aber auch die großen gesellschaftlichen Akteure wie Gewerkschaften und Kirchen sowie die Privatwirtschaft meist problemlos möglich ist, eine personelle und fachliche Begleitung von bzw. Beteiligung an der Entwicklung von Forschungsprogrammatiken zu organisieren, fällt dies den zivilgesellschaftlichen Organisationen aus dem Umwelt-, Entwicklungs- oder Sozialbereich deutlich schwerer, weil sie häufig nur wenige bezahlte Mitarbeiter haben, deren Arbeit zum großen Teil aus Mitgliedsbeiträgen finanziert wird. Seit Längerem vorgebrachte Forderungen, dass Fördermittel nicht nur sporadisch, sondern mit längerfristiger Zusage für eine organisierte Teilhabe von NRO-Vertretern durch die Forschungspolitik zur Verfügung gestellt werden, erscheinen deshalb plausibel.

Für die Förderung und Organisation gesellschaftlicher Diskursaktivitäten erscheint eine direkte Einbindung möglichst breiter Kreise der Öffentlichkeit angesichts der frühen Entwicklungsstufe der Synbio weniger geeignet als indirekte Maßnahmen. Das Konzept von RRI bietet entsprechende Methoden an, zu denen neben der Beteiligung von Stakeholdern an Forschungs- und Innovationsprozessen und der Analyse und Diskussion von Zukunftsszenarien (»Vision Assessment«) auch die Unterstützung von intermediären Akteuren wie Wissenschaftsjournalisten, Künstlern und anderen Wissenschaftsvermittlern gehört.

**PERSPEKTIVEN EINER AKTIVEN TEILHABE VON BÜRGERN AN BIOTECHNOLOGISCHER FORSCHUNG IN FORM VON CITIZEN SCIENCE/DIY-BIOLOGIE**

Während die Beteiligung von Einzelpersonen an der Diskussion oder gar Ausgestaltung von Forschungsagenden letztlich nur einen kleinen Kreis umfassen kann, bieten die unterschiedlichen Formen der Citizen Science grundsätzlich sehr vielen Menschen eine Teilhabemöglichkeit konkret sogar an Forschungsprojekten. Projekte der Bürgerforschung werden vom BMBF seit einigen Jahren gezielt gefördert.

Hierbei dominieren bislang Vorhaben, bei denen die Bürger vorrangig an der Datenerhebung beteiligt sind (beispielsweise bei Tierartenzählprojekten oder astronomischen Beobachtungen) – also eine Art »Wissenschaft *mit* Bürgern«. Eine aktivere Variante stellt die DIY-Biologie dar, bei der es um eine »Wissenschaft« bzw. ein »Forschen *durch* Bürger« geht. Die bisherigen Mitglieder der sehr heterogenen DIY-Bioszene verfolgen unterschiedliche Ziele, die von reinem Hobby über einen demokratietheoretisch fundierten Teilhabeanspruch (an dem Wissensfortschritt und der Debatte in den Biowissenschaften) bis hin zur Entwicklung möglicher Geschäftsideen reichen. Zumindest einige Vertreter repräsentieren durch ihre Verbindung von Bio- und Gentechnologieaffinität und Gesellschaftskritik eine neue Stimme in der nach wie vor großenteils polarisierten Gentechnik- und auch Synbio-Debatte.

Für die Forschungspolitik stellt sich die Frage, ob zu einer umfassenden Beteiligung der Gesellschaft am wissenschaftlichen Fortschritt in der Biotechnologie bzw. der Synbio i. w. S. nicht auch die gezielte Unterstützung von Biohackerspaces gehören sollte, so wie es z. B. in Frankreich oder den USA in gewissem Umfang erfolgt. Erkundet werden könnte auch die Entwicklung von »Bürgerlaboren«, die an Universitäts- oder sonstige Forschungsinstitute angegliedert werden. Dabei müsste allerdings gewährleistet sein, dass diese über Kommunikations- bzw. Bildungsmaßnahmen wie die bestehenden »gläsernen Labore« u. Ä. hinausgehen und ganz explizit Platz für eigene Ideen nichtprofessioneller Akteure geschaffen wird. Ein entscheidender Punkt dabei wäre – wie so oft – die Frage der Finanzierung dieser Bürgerlabore, aber auch der zeitlichen Möglichkeiten von angestellten Wissenschaftlern aus den »gastgebenden« Instituten, sich ohne Erfolgs- und Publikationsdruck einem offenen Austausch und dem Experimentieren mit den »Bürgerforschern« widmen zu können. Die Vermittlung und Einhaltung der Biosicherheitsregularien müssen selbstverständlich gewährleistet werden. Eine maßvolle Weiterentwicklung durch eine geringfügige Reduktion der Anforderungen an die Sachkunde bzw. Berufserfahrung des Betreibers, die Festlegung einer S-½-Sicherheitsstufe oder einer Selbstklonierungswhitelist könnten in diesem Zusammenhang geprüft werden.

**UMGANG MIT BIOLOGISCHEN GEFAHREN UND DUAL-USE-FRAGEN**

Dual-Use-Fragen sind bei Weitem nicht auf die Biowissenschaften beschränkt, sondern stellen sich in sehr vielen Forschungsbereichen. Insofern sind die Aktivitäten der Forschungsorganisationen (u. a. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Max-Planck-Gesellschaft, Leibniz-Gemeinschaft) und Wissenschaftsakademien (v. a. Leopoldina) zu einer fächerübergreifenden Bewusstseinsschaffung sowie der konkreten Schaffung von Kommissionen für Ethik der Forschung als fachübergreifende Anlaufstellen in allen deutschen Forschungseinrichtungen sinnvoll und unbedingt unterstützenswert.

Mit Blick auf besorgniserregende biosicherheitsrelevante Forschungsvorhaben (DURC) stellt sich aber die Frage nach der notwendigen Kompetenz entsprechender Gremien zur Einschätzung spezifischer Missbrauchsmöglichkeiten sowie dem Grad der Verbindlichkeit der Beteiligung. Gerade weil es sich anscheinend nur um ganz wenige Fälle handelt, erscheint die Empfehlung des Deutschen Ethikrates, eine zentrale bundesweite DURC-Kommission einzurichten, naheliegend. Das gilt auch für den Vorschlag einer gesetzlichen Verankerung dieses Gremiums, weil eine mögliche gezielte, ausnahmsweise Beschränkung der Forschungsfreiheit als fundamentales Grundrecht einer sehr starken Legitimation bedürfte.

Mindestens genauso wichtig erscheint aber die systematische Integration der Themen Biosecurity und Dual Use in die universitären Curricula und sonstigen Ausbildungsordnungen der Biowissenschaften. Ein fundamentales Problem für die ernsthafte Befassung der Forschenden mit Fragen des möglichen Missbrauchs liegt in der immer kürzeren Befristung der Verträge in Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen, weil dadurch zum einen die Bindung der Forschenden an die jeweilige Einrichtung (und damit ihre jeweiligen Verhaltenskodizes) nicht stark ausgeprägt wird und weil dadurch zum anderen der Erfolgs- bzw. Publikationsdruck steigt. Die Motivation, aber auch die Möglichkeiten einzelner Wissenschaftler, sich mit ethischen Fragen der eigenen Forschung intensiver zu befassen, werden dadurch eingeschränkt.

Mit Blick auf Szenarien einer künftig deutlich leistungsstärkeren, billigeren und dezentralen Gen(om)synthese – als zentrale Voraussetzung, aber auch als erwartbare weitere Entwicklung der

Synbio – wird die sehr schwierige Frage zu klären sein, in welcher Form eine Erfassung und Kontrolle (der Geräte, ihrer Anwender und konkreten Anwendungen, d. h. der hergestellten Gensequenzen) vorgenommen werden soll und kann. Theoretisch müssten entsprechende Maßnahmen und Verfahren im Konsens global und flächendeckend eingeführt werden, sie müssten finanzierbar sein und dürften den Forschungs- und Entwicklungswettbewerb in Wissenschaft und Industrie nicht unnötig behindern bzw. gar verunmöglichen.

**NACHHALTIGE MODELLE FÜR SCHUTZ UND NUTZUNG GEISTIGEN EIGENTUMS**

Die Frage, wie geistiges Eigentum, das von den modernen Biowissenschaften hervorgebracht wird, geschützt werden kann und soll, ist eine der am heftigsten umstrittenen in der Gentechnologiedebatte, aus ökonomischen und ethischen Gründen. Die äußerst unübersichtliche Daten- und Debattenlage hierzu konnte im Rahmen des vorliegenden Berichts nicht vertieft aufgearbeitet, sondern nur in einigen Synbio- und DIY-biospezifischen Facetten angerissen werden. U. a. ist mit Blick auf zukünftige, i. e. S. »designte« Molekülstrukturen, Gene oder gar Organismen zu beachten, dass für diese eine gewerbliche Unterschutzstellung viel plausibler sein wird als für vorrangig analytische Ergebnisse in Form natürlich vorkommender DNA-Sequenzen. Eine Neuheit besteht außerdem darin, dass neben dem (mit all seinen Kontroversen und Fallstricken) etablierten (Bio-)Patentrecht zunehmend das Urheberrecht als künftiges Schutz- und Nutzungskonzept diskutiert wird – entsprechend der Annahme, dass die Zukunft der Synbio dahingeht, dass eine Gestaltung von biologischer Information (v. a. der DNA, darüber dann auch sonstiger Moleküle bzw. Eigenschaften synthetischer Systeme) ähnlich dem Programmieren von Softwarecodes erfolgt.

Für die Forschungspolitik stellt sich die Frage, ob bzw. welche Formen und Projekte der Förderung mit Vorgaben für die Zugangs- und Nutzungsbedingungen der Ergebnisse verknüpft werden können bzw. sollen. Diese Frage wird seit Jahren in Wissenschaft und Politik weit über den Bereich der Biowissenschaften hinaus intensiv diskutiert. Es ist evident, dass der Umgang mit geistigem Eigentum unter den Bedingungen einer zunehmend digitalen Ökonomie eines der ganz großen Themen für die Wissenschaft sowie die Forschungs- und Wirtschaftspolitik in den nächsten Jahren bleiben wird. Die Entwicklung von wissenschaftlich, ökonomisch, sozial, politisch und rechtlich realistischen, innovativen Regelungsmodellen wäre eine sehr herausfordernde, aufwendige Aufgabe für eine vertiefende Technikfolgenabschätzung.

**HERAUSFORDERUNGEN DER ABSEHBAREN NEUEN GENTECHNIKDEBATTE**

Während die Perspektiven und Potenziale der Synbio i. e. S. – also der Herstellung von »am Reißbrett« entworfenen und de novo konstruierten Zellen oder Organismen – im Frühjahr 2015 nach wie vor den Status einer Zukunftsvision aufweisen, hat sich die Situation bei der Synbio i. w. S., verstanden als nächste Stufe der Bio- bzw. Gentechnologie, in jüngster Zeit massiv gewandelt. Die Diskussion über die neuen Möglichkeiten und Konsequenzen der Genome-Editing-Verfahren hat sich in den letzten Wochen der Berichtsfertigstellung so ausgebreitet und intensiviert, dass von einer grundlegenden Veränderung der Debattenlage über die Weiterentwicklung und -nutzung von Genmanipulationstechniken auszugehen ist.

Absehbar ist, dass das Problem einer Sicherheitsbewertung bzw. Risikoabschätzung ohne substanziell ähnlichen, vertrauten Vergleichsorganismus eine viel höhere Dringlichkeit erhält, wenn die Genome-Editing-Verfahren in der kommenden Zeit weltweit zur extensiven Veränderung von Geno-

men angewendet werden. Insofern dürfte eine Intensivierung der Biosicherheitsforschung unumgänglich sein, sowohl national als auch über internationale Kooperationen. Das globale Ausmaß und die Folgen dieser Entwicklung sind im Einzelnen kaum abzusehen. Aber klar erscheint, dass sich in den kommenden Jahren nicht nur für die Forschungspolitik, sondern voraussichtlich auch für den Deutschen Bundestag als Gesetzgeber viele neue, zum Teil auch nur erneute Fragen zur Förderung, zur sozioökonomischen und ethischen Bewertung sowie zur Regulierung der Anwendungen der Gentechnologie ergeben werden, bei denen es letztlich keine große Rolle spielt, ob die Technologien und Verfahren als Synthetische Biologie bezeichnet werden. Neu ist daran auch die gewachsene Bedeutung der internationalen Dimension der Fragen (bzw. entsprechender Antworten/Lösungsansätze), die sich nicht zuletzt aus der gewachsenen und weiter zunehmenden wissenschaftlichen und technologischen Kapazität der Schwellenländer ergibt. Ein kontinuierliches Monitoring der globalen Entwicklungen unter Nutzung wissenschaftlich valider Indikatoren und eine regelmäßige Berichterstattung erscheinen daher naheliegend.

# EINLEITUNG I.

Synthetische Biologie – eine zunächst eigenartig wirkende, fast widersprüchliche Wortkombination? Während die Chemie seit der Harnstoffsynthese durch Friedrich Wöhler im Jahr 1828 zunehmend zur Produktion von naturidentischen oder künstlichen, also von Menschen erdachten oder experimentell hergestellten Stoffen genutzt wurde und das 20. Jahrhundert vermutlich ohne großen Widerspruch auch als das Jahrhundert des Kunststoffs bezeichnet werden kann, wurden für die Biowissenschaften seit den 1970er Jahren zwar zunehmend Anwendungsbereiche in Form moderner Biotechnologie erschlossen – aber als »synthetische Biologie« wurde z. B. die Gentechnik nur ganz vereinzelt bezeichnet.

Ende 2003 tauchte der Begriff Synthetische Biologie im Bereich »Künftiger Wissenschafts- und Technologiebedarf« (»New and Emerging Science and Technology« [NEST]) der EU-Kommission auf, im Jahr 2004 wurde am Massachusetts Institute of Technology (MIT) eine erste internationale Konferenz unter dem Titel veranstaltet. Im Herbst 2005 schrieb die EU ein erstes umfangreiches Forschungsförderprogramm aus. Der größte Teil der Mittel floss in naturwissenschaftliche Forschungsvorhaben, daneben wurde aber auch eine Reihe von Projekten zur ethischen, rechtlichen und sozialen Analyse bzw. Technikfolgenabschätzung der Synthetischen Biologie in Auftrag gegeben. Die erste größere interdisziplinäre Stellungnahme in Deutschland wurde im Juli 2009 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) und der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina vorgelegt (DFG et al. 2009).

Mit Synthetischer Biologie wurde darin die gemeinsame Unternehmung unterschiedlichster Fachrichtungen (Biologie, Chemie, Physik, Mathematik, Ingenieurwissenschaften, Biotechnologie und Informationstechnik) bezeichnet, »biologische Systeme mit neuen, definierten Eigenschaften zu konzipieren. Dabei sollen die – biologischen – Systeme vornehmlich künstlich hergestellt bzw. nachgebaut werden, mit dem Ziel, neue biologische Komponenten sowie neuartige lebende Organismen, die in der Natur in dieser Form nicht bekannt sind, zu gewinnen«. Als »konsequente Weiterentwicklung bestehender Methoden der Molekularbiologie« wurde ihr ein großes Innovationspotenzial sowohl für die Grundlagenforschung als auch die industrielle Anwendung attestiert. Eine zentrale Empfehlung war die Begleitung des neuen Forschungsfeldes durch Methoden der Technikfolgenabschätzung einschließlich einer Stärkung des öffentlichen Diskurses, insbesondere zur ethischen Bewertung möglicher Nutzen und Risiken. Daneben wurde eine konkrete Beobachtung sicherheitsrelevanter Forschungsaktivitäten durch die Zentrale Kommission für die Biologische Sicherheit (ZKBS) des Bundesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) empfohlen. Diese legte im November 2012 einen ersten kurzen Bericht vor, in dem kein akuter Handlungsbedarf beschrieben wurde (ZKBS 2012 a).

Auch der Deutsche Ethikrat hatte sich im Rahmen einer öffentlichen Sitzung im Frühjahr 2009 mit der Synthetischen Biologie befasst und war zu dem Ergebnis gekommen, das vorerst keine Veranlassung bestehe, das Thema in sein Arbeitsprogramm aufzunehmen, weil keine grundsätzlich neuen Fragen in der Biotechnologie aufgeworfen würden (DER 2010). Das damalige »Spiegelgremium« im Parlament, der Ethikbeirat des Deutschen Bundestages, veranstaltete kurz danach ein weiteres Expertengespräch und gelangte ebenfalls zu der Einschätzung, dass kein akuter Handlungsbedarf

im Hinblick auf eine Aufbereitung des Themas unter ethischen, gesellschaftlichen, naturwissenschaftlichen oder rechtlichen Aspekten bestehe. Allerdings war in dem Expertengespräch des Ethikbeirats auch deutlich geworden, dass das Forschungsgebiet von einer hohen Dynamik geprägt ist, weshalb eine laufende Beobachtung durch den Deutschen Ethikrat angezeigt sei (Ethikbeirat 2009).

## BEAUFTRAGUNG UND UMSETZUNG

Dieser Beobachtungsauftrag wurde im Jahr 2010 auch vom ABFTA aufgegriffen und mündete in eine Beauftragung des TAB mit einem TA-Projekt zur Synthetischen Biologie, das im Frühjahr 2011 begonnen wurde. Die Untersuchung sollte sich neben naturwissenschaftlich-technologischen Aspekten insbesondere auf Fragen der Ethik, der Sicherheit (Biosafety und Biosecurity), des geistigen Eigentums, der Regulierung (bzw. Governance), der öffentlichen Wahrnehmung sowie einer adäquaten und frühzeitigen Chancen- und Risikokommunikation richten.

Angesichts einer größeren Zahl parallel laufender TA-Untersuchungen (in Deutschland u. a. durch den TAB-Betreiber Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), den damaligen Kooperationspartner Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI sowie die Universitäten Bremen, Erlangen-Nürnberg und Freiburg; unter den Mitgliedsinstitutionen des European Parliamentary Technology Assessment Network (EPTA) durch das niederländische Rathenau Instituut und das Institut für Technikfolgenabschätzung der österreichischen Akademie der Wissenschaften ITA; Sauter 2011, S. 20 f.) stellte sich von Anfang an die Gefahr unergiebiger Doppel- bzw. Mehrfacharbeit. Hinzu kam, dass aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums die Zahl der zur Synthetischen Biologie zu zählenden Projekte und entsprechend auch der möglichen Experten begrenzt war, woraus zwischen den zahlreichen TA-Projekten nicht nur inhaltliche, sondern auch personelle Überschneidungen resultierten. Als Reaktion darauf sah das Projektkonzept vor, in einer ersten Phase die vorliegenden und aus den genannten laufenden Projekten zugänglichen Ergebnisse zusammenzustellen und auszuwerten, bevor über eine Vertiefung besonders wichtiger Teilfragen mithilfe der Vergabe externer Gutachten entschieden werden sollte.

Hierzu erarbeiteten die Projektbeteiligten des damaligen TAB-Kooperationspartners Fraunhofer ISI, Dr. Thomas Reiß und Davy van Doren, zunächst einen Überblick über die grundsätzliche Themenstrukturierung sowie zu den Anwendungspotenzialen der Synthetischen Biologie. In einem nächsten Schritt untersuchten Reiß und van Doren vertieft das Anwendungsfeld Energieerzeugung (Biokraftstoffe), und es wurden Gutachten an zwei Arbeitsgruppen, die selbst in größeren TA-Projekten das Thema bearbeiteten, zu folgenden Fragestellungen vergeben:

> *Bedeutung der Grenzüberschreitung zwischen Disziplinen und Akteuren in der Synthetischen Biologie*. Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler gGmbH (Autorinnen: Dr. Margret Engelhard, Dr. Kristin Hagen)
> *Charakterisierung der Synthetischen Biologie einschließlich einer Darstellung möglicher Entwicklungsperspektiven und gesellschaftlicher Einflussmöglichkeiten*. aforetec GbR, Bremen (Autoren: Prof. Dr. Arnim von Gleich, Dr. Bernd Giese, Dipl.-Biol. Stefan Königstein, Prof. Dr. Jan C. Schmidt)

Die Anwendungsfelder Chemie, Medizin, Umweltschutz und Biomaterialien wurden auf Basis der Arbeiten des ITAS von Dr. Harald König und dem Projektleiter, Dr. Arnold Sauter, dargestellt. Auch die Analyse der Themen Biosafety und Biosecurity wurde von ihnen durchgeführt. Die ITAS-Mitarbeiter Reinhard Heil, Daniel Frank und Christopher Coenen steuerten Ausarbeitungen zu kulturellen und ethischen Aspekten der Synthetischen Biologie bei, die Ausgangspunkte für den Zuschnitt des Berichts und die Entscheidung über die Vertiefungsthemen bildeten. Die Themen Synthetische Biologie und Öffentlichkeit sowie Begleitforschung und Governance wurden zunächst von Sebastian Elsbach und David Mauer im Rahmen längerer Praktika mit Betreuung durch den Projektleiter untersucht, die entsprechenden Kapitel dann später federführend von Dr. Steffen Albrecht erarbeitet. Ein besonderes Augenmerk wurde auf Wunsch der Berichterstattergruppe für TA auf ein Thema gelegt, das im Frühjahr 2012 verstärkt in den Medien auftauchte: die DIY-Bio(techno)logie, auch Biohacking genannt. Hierzu wurden zunächst eine Kurzexpertise an Rüdiger Trojok sowie ein Kommentarkurzgutachten an Christof Potthof vom Gen-ethischen Netzwerk e. V. vergeben. Eine vertiefte Ausarbeitung erfolgte dann durch Rüdiger Trojok im Rahmen einer weiteren Kurzexpertise sowie als ITAS-Mitarbeiter im Zuge der Endberichtserstellung.

Die Hauptverantwortung für die Auswahl und Zusammenführung der Informationen aus diesen und weiteren im Bericht genannten Quellen sowie für den Zuschnitt des vorliegenden Abschlussberichts liegt beim Projektleiter, Arnold Sauter. Allen Mitautoren des Gesamtberichts – also Steffen Albrecht, Davy van Doren, Harald König, Thomas Reiß und Rüdiger Trojok – ebenso wie den genannten Gutachterinnen und Gutachtern sei sehr herzlich für die geduldige und engagierte Kooperation in dem Projekt gedankt. Ein besonderer Dank geht darüber hinaus an Brigitta-Ulrike Goelsdorf für das kundige Korrektorat und an Johanna Kern für das Layout.

## ANLIEGEN UND INHALTE DES BERICHTS

Wie bei allen Untersuchungen zur Synthetischen Biologie *(im Folgenden aus Gründen der Lesbarkeit häufig als Synbio abgekürzt)* stellte sich auch im Projekt des TAB das zentrale Problem, dass es kein weithin geteiltes Verständnis über das Wesen und damit die Abgrenzung der Synbio gegenüber weiteren Forschungs- und Entwicklungslinien der angewandten Biowissenschaften gibt. Synthetische Biologie »ist« nicht *dies* oder *jenes* – sie wird vielmehr in Stellungnahmen und Debatten konstruiert bzw. als Zielstellung entworfen und postuliert. Synthetische Biologie ist bislang weder eine akademische Fachrichtung noch ein klar eingrenzbares Forschungsfeld. Allerdings findet möglicherweise gegenwärtig eine Disziplinenformung der Synthetischen Biologie statt (Bensaude-Vincent 2013a; Kronberger 2012; Molyneux-Hodgson/Meyer 2009), deren Ausgang noch nicht absehbar ist. Grundsätzlich sind Einschätzungen zur Synbio stark geprägt durch den Zeitpunkt ihrer Entstehung sowie die Positionen und die damit verbundenen Interessen und Perspektiven der jeweiligen Akteure, woraus eine große Unübersichtlichkeit und vielfältige Missverständnisse in der Debatte resultieren.

Wie kann TA darauf reagieren? Einrichtungen, die einer eher wissenschafts- oder gesellschaftsorientierten TA verpflichtet sind, wie das ITAS oder die EA European Academy of Technology and Innovation Assessment GmbH (vormals Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler gGmbH), verfolgen betont dis-

kursive Untersuchungsansätze, die eine sehr breite, offene Perspektive auf das Thema Synbio einnehmen. Dasselbe gilt für einige Universitätsinstitute sowie EPTA-Einrichtungen mit anderer Grundausrichtung als das TAB (darunter ITA und Rathenau-Instituut). Die entsprechenden Projekte bzw. Aktivitäten umfassen zum Teil sehr intensive akademische Auseinandersetzungen mit grundlegenden philosophischen, wissenschafts- und modelltheoretischen Fragen (z. B. zum Lebens- und Schaffensbegriff, zur Rolle des Ingenieurdenkens, zur Komplexität oder zum Rauschen in biologischen Systemen; Engelhard 2015; Giese et al. 2014) oder erstrecken sich auf die aktive Beförderung und Gestaltung der gesellschaftlichen Debatte durch eine Vielzahl von Diskussions- und Kommunikationsformaten bis hin zur Förderung von Filmfestivals oder Theaterstücken zum Thema (so im EU-geförderten SYNENERGENE-Projekt unter Leitung des ITAS; Kap. V.2.7).

Mit Blick auf den primären Auftrag des TAB, den Deutschen Bundestag – und in diesem Fall insbesondere den ABFTA – zu beraten, stellte sich die große Herausforderung, mit der Komplexität, Unschärfe und Offenheit des Themas so umzugehen, dass der Wunsch der Politik nach einer möglichst konkreten, neutralen, umsichtigen und nützlichen Analyse erfüllt werden konnte. Im Lauf des Projekts resultierten aus der kontinuierlichen Reflexion des möglichen Umgangs mit dieser Herausforderung folgende Orientierungspunkte, an denen der vorliegende Bericht ausgerichtete wurde:

> keine zu akademische Betrachtung der Frage nach dem Wesen der Synbio;
> keine vertiefte Darstellung überwiegend spekulativer Visionen bzw. Szenarien zukünftiger Anwendungen und Folgen der Synbio;
> stattdessen eine möglichst umfassende, aber konzentrierte Einordnung der Debatten über die Potenziale und Perspektiven der Synbio in größere wissenschafts-, forschungs- und innovationspolitische Kontexte –
> mit dem Ziel der Herausarbeitung und Charakterisierung wichtiger verbundener, zukunftsrelevanter Themen und Handlungsfelder für den Bundestag und speziell den ABFTA.

Durch die im Vergleich zur ursprünglichen Planung längere Dauer ist das Projekt selbst zu einer Art Monitoring der Synbio geworden – mit der durchaus günstigen Konsequenz, dass seit 2011 eine gewisse Entwicklung im Bereich Forschung und Entwicklung (FuE), vor allem aber der Debatte stattgefunden hat, wodurch einige Positionen und Herausforderungen der Beteiligten klarer geworden sind und mit größerer Sorgfalt analysiert werden konnten. Für den vorliegenden Abschlussbericht resultierte insgesamt folgender Aufbau:

In Kapitel II (*Vision, Sammelbegriff, Zielstellung? – Multiple Perspektiven auf Synthetische Biologie*) wird ein kurzer Blick auf die Etablierung und die Variationen des Begriffs Synbio geworfen. Als Reaktion auf das Problem der heterogenen, teils widersprüchlichen oder aber zu unscharfen Definitionsversuche wird im vorliegenden Bericht eine Basisunterscheidung zwischen Synbio i. e. S. und Synbio i. w. S. eingeführt und für die Folgenanalyse und -debatte benutzt.

Der *Stand von Forschung, Entwicklung und Anwendung* wird in Kapitel III in den Bereichen Chemieproduktion, Energiegewinnung, Medizin, Altlastensanierung und Umweltsensorik sowie Materialherstellung dargestellt. Die meisten Beispiele stellen keine Projekte des Synbio i. e. S. dar, sondern repräsentieren Weiterentwicklungen bisheriger Ansätze, gehören also zur Synbio i. w. S. Da sich fast alle FuE-Projekte in frühen Stadien befinden, kann eine Abschätzung des ökonomischen Potenzials unter Betrachtung alternativer Optionen nur in Einzelfällen und mit großer Unsicherheit erfolgen.

Kapitel IV behandelt *Sicherheitsfragen der Synthetischen Biologie.* Die übliche Differenzierung von *Biosafety* – biologische Risiken einer legalen und geplanten Freisetzung und Nutzung von synthetisch veränderten Organismen – und *Biosecurity* – Risiken einer illegalen und/oder böswilligen Freisetzung/Nutzung – wird auch im vorliegenden Bericht benutzt. Dabei zeigt sich, dass sich im Bereich der Biosafety schon bald grundsätzliche neue Fragen und Herausforderungen durch die Entwicklungen der Synbio ergeben dürften und darüber hinaus bereits jetzt bestehende, durchaus drängende Fragen zum möglichen Missbrauch biologischer Agenzien verstärkt werden könnten.

Kapitel V widmet sich unter der Überschrift *Synbio und Öffentlichkeit – vom Nichtwissen zur Mitgestaltung* der öffentlichen Kommunikation sowie den umfangreichen Diskursaktivitäten zum Thema Synbio. Dabei liegt der Fokus auf neuartigen Formen der Begleitforschung und Governance des FuE-Prozesses, die in den vergangenen Jahren u. a. in den Niederlanden, dem Vereinigten Königreich, in Deutschland und auf EU-Ebene angestoßen worden sind. Die gezielte Miteinbeziehung ganz unterschiedlicher gesellschaftlicher Akteure in die Diskussion über Ziele, Potenziale und Probleme der Entwicklung und Nutzung von Wissenschaft und Technologie wird bei der Synbio besonders früh und umfassend durch die Forschungs- und Innovationspolitik gefördert. Die Synbio ist damit eines der zentralen Forschungsfelder, anhand dessen eine neue Form der gemeinsamen Verantwortungsübernahme bei der Technologieentwicklung erprobt werden soll, die Technikfolgenabschätzung, Beteiligungsverfahren, ethische Analyse und Nachfrageorientierung systematisch zusammenführt und insbesondere von der EU-Kommission unter dem Begriff »Responsible Research and Innovation« (RRI) seit einigen Jahren stark gefördert wird (TAB 2015c).

Kapitel VI behandelt die *DIY-Bio(techno)logie – Akteure und Perspektiven*. Beschrieben werden die bisherigen Entwicklungen und Erscheinungsformen der sehr heterogenen Szene, die sich aus Künstlern, interessierten Laien sowie Wissenschaftlern unterschiedlicher Herkunft und Interessenlage zusammensetzt. Während diese Biohacker bislang noch einen deutlichen technologischen Rückstand auf den State of the Art haben und deshalb meist noch nicht einmal Synbio i. w. S. betreiben, könnte sich dies insbesondere durch die zunehmende »Informatisierung« der Bio(techno)logie ab einem bestimmten Zeitpunkt dieser Entwicklung sehr schnell ändern. Daher werden in diesem Kapitel explizit auch Zukunftsszenarien umrissen, die illustrieren sollen, wohin sich das Feld bewegen und welche Auswirkungen eine Popularisierung und Verbreitung biotechnologischer Aktivitäten haben könnten.

Das abschließende Kapitel VII resümiert die Ergebnisse der Untersuchung mit Blick auf Fragen des Neuigkeitswerts und der gesellschaftlichen Relevanz der Synbio sowie der politischen Zuständigkeiten. Auf dieser Basis werden sechs *Handlungsfelder* bzw. Themenbereiche herausgearbeitet, vorrangig für die Forschungspolitik, teils auch für die (vorsorgende) Umwelt- und die Wirtschaftspolitik.

# VISION, SAMMELBEGRIFF, ZIELSTELLUNG? – MULTIPLE PERSPEKTIVEN AUF SYNTHETISCHE BIOLOGIE II.

Wie in der Einleitung (Kap. I) bereits herausgestellt, gibt es kein weithin geteiltes Verständnis über das Wesen und damit die Abgrenzung der Synbio gegenüber anderen Forschungs- und Entwicklungslinien der angewandten Biowissenschaften. Um dennoch eine möglichst konsistente Analyse durchführen zu können, ist es zunächst nötig, einen Blick auf gängige Definitionen und Perspektiven zu werfen (Kap. II.1), um danach die im vorliegenden Bericht gewählte Systemabgrenzung bzw. Rahmung zu erläutern (Kap. II.2).

## Etablierung des Forschungsfeldes und Variationen des Begriffs Synthetische Biologie 1.

Bei der historischen Einordnung der Synthetischen Biologie ist zwischen der Namensgeschichte und der konzeptionellen und experimentellen Geschichte zu unterscheiden (hierzu und zum Folgenden Engelhard/Hagen 2012, S. 12). Als früheste Quelle für die Verwendung des Begriffs gilt die Veröffentlichung des Chemikers Stéphane Leduc »La Biologie Synthéthique« von 1912. In seinen Experimenten züchtete er eine Vielzahl von Kristallen in verschiedenen sogenannten »chemischen Gärten«, deren Wachstum einem besseren Verständnis von Leben dienen sollte. Seine Zeitgenossen kritisierten allerdings zu Recht, dass es sich nicht um synthetisches Leben, sondern um eine Imitation von Leben handle. Jacques Loeb postulierte im selben Jahr, dass es prinzipiell möglich sein sollte, künstliche lebende Systeme zu generieren (DFG et al. 2009, S. 11).

Der Begriff fand dann vereinzelt in den 1970er Jahren wieder Verwendung, um die als Gentechnik – bzw. im Englischen als »genetic engineering« – bezeichneten Methoden zur gezielten Veränderung von DNA zu charakterisieren (Engelhard/Hagen 2012, S. 12). Für die mittlerweile teils als »klassisch« bezeichneten Anwendungen der Gentechnik, die sich zunächst aus methodischen, kapazitativen Gründen auf einzelne Gene bzw. Eigenschaften beschränken mussten, hat sich der Begriff Synthetische Biologie aber nie richtig durchgesetzt, sondern wurde nur sporadisch verwendet (beispielsweise von Gill 1991, der im Untertitel seines Buches von der »Brisanz der Synthetischen Biologie« sprach).

Im Vorfeld der ersten internationalen Konferenz zur Synthetischen Biologie (»Synthetic Biology 1.0«) im Sommer 2004 am MIT wurde der Name »Intentional Biology« diskutiert und wieder verworfen, weil er impliziert hätte, dass andere Zweige der Biologie »unintentional« seien (hierzu und zum Folgenden: Engelhard/Hagen 2012, S. 12 f.). Der Begriff Synthetische Biologie wurde dann bewusst in Analogie zur Synthetischen Chemie gewählt (Campos 2010), die im 19. Jahrhundert die industrielle Anwendung der zuvor vorrangig deskriptiven Wissenschaft Chemie ermöglichte und diese zu einer der prägenden Disziplinen des 20. Jahrhunderts machte.

Ab dem Jahr 2005 erfolgte eine massive Förderung von FuE-Vorhaben der Synbio insbesondere in den USA, aber auch in der EU. Laut dem US-amerikanischen Woodrow Wilson International Center for Scholars (WWICS 2010) investierten die USA von 2005 bis 2010 rund 430 Mio. US-Dollar in die Förderung der Synthetischen Biologie, davon ca. 4 % in die ethische, rechtliche und soziale Begleitforschung. Für die EU (Kommission und nationale Fördermittel, insbesondere aus Großbritannien, den Niederlanden und Deutschland) wurde ein Fördersumme von 160 Mio. US-Dollar angegeben (WWICS 2010; Näheres zu Förderaktivitäten in Kap. V.2.3 bis V.2.6). Gleichzeitig setzte eine intensive interdisziplinäre Befassung in politischen Beratungsgremien, Ethikkommissionen, Akademien und Förderorganisationen ein, die gegen Ende der 2000er Jahre in einer Vielzahl von Berichten und Stellungnahmen u. a. in den Niederlanden, Großbritannien, der Schweiz, Deutschland und den USA resultierte (Kasten II.1). Auch gentechnikkritische Umweltorganisationen meldeten sich zu Wort und schafften es, das Thema Synbio seit 2010 auf die Tagesordnung der Biodiversitätskonventionstreffen (COP-10 bis COP-12) zu setzen. Allerdings erfolgte bislang keine breitere Mobilisierung zivilgesellschaftlicher Organisationen, trotz des Labels »Extreme genetic engineering«, das die ETC Group 2007 kreiert hatte (ETC Group 2007 u. 2008; Näheres in Kap. V.1.3).

**KASTEN II.1: AUSGEWÄHLTE BERICHTE UND STELLUNGNAHMEN ZU DEN POTENZIALEN DER SYNTHETISCHEN BIOLOGIE AUS DEN JAHREN 2008 BIS 2010**

> *Niederlande*: Commissie Genetische Modificatie (COGEM 2008): Biological machines? Anticipating developments in synthetic biology.
> *Deutschland:* Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech), Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (2009): Synthetische Biologie – Stellungnahme.
> *Vereinigtes Königreich*: The Royal Academy of Engineering (RAE 2009a): Synthetic Biology: Scope, Applications and Implications. Dieselbe (RAE 2009b): Synthetic Biology: public dialogue on synthetic biology.
> *Vereinigtes Königreich*: Biotechnology and Biological Sciences Research Council (BBSRC), Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC), Sciencewise – ERC (2010): Synthetic Biology Dialogue.
> *Schweiz*: Schweizerische Eidgenössischen Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich (EKAH 2010): Synthetische Biologie – Ethische Überlegungen.
> *EU*: European Group on Ethics in Science and New Technologies (EGE 2009): Ethics of synthetic biology.
> *Member States of the EU*: The European Academies Science Advisory Council (EASAC 2010): Realising European potential in synthetic biology: scientific opportunities and good governance.
> *USA*: Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues (PCSBI 2010a): New Directions. The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies.

In den Berichten und Stellungnahmen spielten Fragen der Definition, der Neuartigkeit und der Systemabgrenzung eine große Rolle. Zumeist wurde eine »1-Satz-Definition« formuliert, die in verschiedenen Dokumenten recht ähnlich klingt (was aufgrund der gegenseitigen, konsekutiven Bezugnahmen wenig verwunderlich ist) (Herv. d. Verf.):

> »Synthetic biology aims to *design and engineer biologically based parts, novel devices and systems as well as redesigning existing, natural biological systems*.« (RAE 2009a)
> »Dabei sollen die Systeme *vornehmlich künstlich hergestellt bzw. nachgebaut werden, mit dem Ziel, neue biologische Komponenten sowie neuartige lebende Organismen, die in der Natur in dieser Form nicht bekannt sind, zu gewinnen*.« (DFG et al. 2009)
> »Synthetic biology may be viewed from various perspectives, which together help to explain its utility and versatility. A common thread is that synthetic biology is *a scientific discipline that relies on chemically synthesized DNA, along with standardized and automatable processes, to address human needs by the creation of organisms with novel or enhanced characteristics or traits*.« (PCSBI 2010a)
> »The academies express their definition of synthetic biology in different ways but they agree on a core meaning: ›*the deliberate (re)design and construction of novel biological systems to perform new functions, that draws on principles elucidated from biology and engineering*‹.« (EASAC 2010)

Weil diese Kurzdefinitionen allerdings wenig geeignet sind, eine Abgrenzung insbesondere gegenüber der Gentechnologie zu leisten, erfolgte in den meisten Fällen eine ausführliche Beschreibung der jeweiligen Perspektive auf das FuE-Feld Synbio, wobei dann deutlichere Unterschiede in Bezug auf das angenommene Potenzial und die erwartbaren Herausforderungen offensichtlich wurden.

Im TAB-Projekt wurde das gewählte Verständnis der Synthetischen Biologie zu Beginn folgendermaßen formuliert (Sauter 2011, S. 16): »Als Synthetische Biologie wird ein Fachgebiet im Grenzbereich von Biologie, Chemie, Biotechnologie, Ingenieurwissenschaften und Informationstechnologie bezeichnet. Es basiert auf den Erkenntnissen und Methoden der Molekular- und Systembiologie, insbesondere der Entschlüsselung kompletter Genome und den technologischen Fortschritten bei der Synthese und Analyse von Nukleinsäuren. Das der Synthetischen Biologie zugrundeliegende Konzept ist die Erzeugung neuer biologischer Systeme, die so nicht in der Natur vorkommen, sowie das Design von einzelnen Molekülen, Zellen und Organismen mit neuen Eigenschaften mithilfe molekularbiologischer Arbeitsschritte und standardisierter ingenieurwissenschaftlicher Prinzipien. Dabei werden verschiedene Strategien verfolgt:

> maschinelle, synthetische Herstellung und Sequenzierung von DNA;
> Synthese von Protozellen mit Merkmalen lebender Zellen mithilfe biochemischer Substanzen ohne konkretes biologisches Vorbild;
> Konstruktion von Minimalzellen mit synthetisch hergestellten Genomen;
> Integration artifizieller, biochemischer Systeme in Lebewesen zur Erzielung neuer Eigenschaften;
> Aufbau chemischer Systeme (neue Biomoleküle) entsprechend biologischen Vorbildern, sodass diese bestimmte Eigenschaften von Lebewesen aufweisen;
> Reduktion von Organismen auf rudimentäre Systemkomponenten zwecks Erzeugung biologischer, auf externe Reize reagierender Schaltkreise durch den Einbau standardisierter Biobausteine (›Biobricks‹).«

Diese Beschreibung folgte grosso modo der Stellungnahme der DFG et al. (2009). Die Synthetische Biologie wurde damit als eine Art Schirm- oder Sammelbegriff (»umbrella term«) verstanden, unter dem eine Vielzahl von Forschungsbereichen erfasst werden kann. Auf eine Vorabbewertung des

Neuigkeitswerts und Veränderungspotenzials der Synthetischen Biologie als »Schlüsseltechnologie«, neue Leitwissenschaft o. Ä. wurde dabei bewusst verzichtet. Vielmehr diente eine solche Perspektive als Ausgangspunkt, um durch ein systematisches Erfassen von Anwendungspotenzialen und -risiken diskutieren zu können, ob das Forschungsfeld Synbio tatsächlich zukunftsweisend und relevant erscheint (hierzu und zum Folgenden Sauter 2011, S. 16 f.).

Einen Gegenpol zu einer solchen, erst einmal suchenden Position bilden Herangehensweisen, welche die Schaffung »künstlichen Lebens« als Kernziel der Synthetischen Biologie verstehen bzw. postulieren und in den Mittelpunkt der Betrachtungen stellen. »Durch die Synthetische Biologie verschiebt sich der menschliche Umgang mit der Natur vom Paradigma der Manipulation zu dem der Kreation.« formulierten beispielsweise Boldt et al. (2009, S. 80); »Vom Veränderer zum Schöpfer« heißt der Titel eines Aufsatzes des Leiters des TAB Armin Grunwald (2010). In den Geistes- und Sozialwissenschaften entwickelte sich daher eine rege wissen(schaft)stheoretische, techniksoziologische, kulturgeschichtliche, philosophische und theologische Debatte zu den impliziten und expliziten Denkmodellen in der Synbio sowie zum Lebens- und Schaffensbegriff (siehe hierzu u. a. Boldt et al. 2012; Dabrock et al. 2011; Schummer 2011). »Playing God« als Metapher für die Frage nach den notwendigen und wünschenswerten Grenzen menschlichen Handelns im Umgang mit der Natur wurde (und wird) darüber hinaus insbesondere von den Medien regelmäßig als Aufhänger für die Berichterstattung über Synbio aufgegriffen (Kap. V.1.1).

Eine dritte, stärker technologieübergreifende und zukunftsbezogene Perspektive auf das Thema Synthetische Biologie wurde in einem TA-Bericht an das Europäische Parlament der European Technology Assessment Group, einem Zusammenschluss mehrerer europäischer TA-Einrichtungen (darunter das ITAS), stark gemacht (ETAG 2012): die Annahme des systematischen und synergistischen Zusammenwachsens biomedizinisch-naturwissenschaftlicher und technisch-ingenieurwissenschaftlicher Entwicklungen im Sinne von »Converging Technologies« (Coenen et al. 2009; TAB 2008a). »Biology is becoming technology« und »Technology is becoming biology« sind laut dem Endbericht des Projekts »Making Perfect Life« der ETAG (2012) zwei Megatrends, die unsere technische und ökonomische Zukunft prägen werden. Demzufolge wäre die Synthetische Biologie eine – wenn nicht gar *die* – Schlüsseltechnologie, weil sie nahezu alle wichtigen Technologien für die Lösung der Zukunftsprobleme der Menschheit vereinigt.

Von anderer Seite wurde hingegen argumentiert, dass die Befassung mit der Verständnis- und vor allem Definitionsfrage der Synbio unproduktiv und daher unnötig sei. So betonte die DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. (2011), dass »[d]ie Synthetische Biologie ... international als eine hochinnovative Disziplin in der modernen Biotechnologie und als wichtige Triebfeder der biologischen Grundlagenforschung anerkannt« sei. »Diskussionen um Begriffsdefinitionen der ›Synthetische Biologie‹ [seien] demgegenüber von untergeordneter Bedeutung, zumal das Gebiet erst im Laufe der Zeit klare Umrisse entwickelt.« Gleichzeitig wurde gefolgert, dass »[d]ie Synthetische Biologie ... international eine konsolidierte Fachdisziplin [sei] und ... auch in Deutschland bereits an verschiedenen Orten Fuß gefasst« habe.

# Synthetische Biologie im engeren und im weiteren Sinn 2.

Die Suche bzw. Forderung nach einer präziseren, weithin akzeptierten und in verschiedenen Kontexten anwendbaren Definition der Synbio hält an (u. a. Ribarits et al. 2014; SCHER et al. 2014a). Auch im Lauf des TAB-Projekts zeigte sich immer deutlicher, dass sowohl für die nähere Charakterisierung der Anwendungs- und Risikopotenziale als auch für eine Einschätzung der weiteren (forschungs)politischen und gesamtgesellschaftlichen Bedeutung die erwähnte bloße »Schirmperspektive« der Synbio nicht hinreichend erscheint, weil es kaum möglich ist, Aussagen zu treffen, die sich auf alle (oder zumindest die meisten) der genannten, recht unterschiedlichen Forschungsansätze beziehen. Eine völlig separierte Betrachtung einzelner Entwicklungslinien (z. B. zu Protozellen, genetischen Schaltkreisen, Genomsynthese) wiederum würde verhindern, den Begriff Synbio überhaupt noch sinnvoll als Klammer verwenden zu können.

Daher nahm die Frage nach der Charakteristik und den Systemgrenzen der Synbio in der ersten Hälfte des TAB-Projekts einen großen Raum ein, sowohl bei den internen Recherchen und Ausarbeitungen als auch in den im Rahmen des Projekts vergebenen Gutachten von Engelhard/Hagen (2012) und von von Gleich et al. (2012). Als Konsequenz aus einer Vielzahl von projektinternen Diskussionen und der Beobachtung der anhaltenden internationalen wissenschafts- und forschungspolitischen Debatte über Definitionen, Verständnis und Abgrenzungsfragen entwickelte sich schließlich die Idee, eine Basisunterscheidung von Synthetischer Biologie im engeren und im weiteren Sinn einzuführen und zu benutzen, die geeignet erscheint, manche Widersprüche und Missverständnisse beim Sprechen und Nachdenken über Synbio zu vermeiden:

> *Synthetische Biologie im engeren Sinn* (Synbio i. e. S.) steht dabei für das Ziel der Erschaffung nichtnatürlicher, sondern »am Reißbrett« entworfener und de novo konstruierter Zellen oder Organismen (oder auch zellfreier biologischer bzw. biochemischer Systeme). Von einigen Akteuren und Beobachtern wird die konzeptionelle Nähe zum Ingenieurdenken und -vorgehen betont, mit den zentralen Schritten Abstraktion (= Reduktion des Systems auf seine wesentlichen Funktionen), Standardisierung (= Einsatz austausch- und kombinierbarer Module) und Entkoppelung (von der Interaktion mit der Umgebung, im Fall der Synbio von der natürlichen Umwelt). Charakteristische Ansätze und Methoden sind die Herstellung kompletter synthetischer Genome (Gibson/Venter 2014; Montague et al. 2012) sowie die Konstruktion sogenannter »Minimalzellen« (d. h. »top down« maximal reduzierter Zellen, sogenannte »Chassis«; Juhas et al. 2011) oder aber von sogenannten Protozellen aus biochemischen Grundbestandteilen (»bottom up« bzw. »from the scratch«; Blain/Szostak 2014). Ein (noch) weiter gehender Forschungsansatz ist der Einsatz von veränderten genetischen Codes und Molekülen (einschließlich nichtnatürlicher, DNA-ähnlicher Moleküle, sogenannter »xeno nucleic acids« [XNA]), die im Stoffwechsel natürlicher Organismen nicht produziert und verarbeitet werden (können), damit die resultierenden synthetischen »Systeme« mit der belebten Natur nicht wechselwirken können (und damit sogenannte orthogonale bzw. xenobiologische Systeme/Organismen repräsentieren; Mandell et al. 2015; Schmidt/Lorenzo 2012). Die Vorhaben der Synbio i. e. S. sollen zum einen zu Erkenntnissen über die Entstehung von Leben (und dessen Chemie) auf der Erde beitragen (z. B. Forster/Church 2007; Szostak et al. 2001) und zum anderen für die Produktion beliebiger, auch völlig neuartiger Substanzen oder visionärer Anwendungen im Gesundheits-, Energie- oder Umweltbereich genutzt werden können (Keasling 2010; Khalil/Collins 2010; Kitney/Freemont 2012; Schmidt/Lorenzo 2012).

> *Synthetische Biologie im weiteren Sinn* (Synbio i. w. S.) bezeichnet demgegenüber als ein Sammelbegriff die aktuell verfolgten anwendungsorientierten, avancierten Methoden, Verfahren und Anwendungen biowissenschaftlicher und sonstiger Erkenntnisse und Technologien zur gezielten (molekularen, oft genetischen) Veränderung biologischer Systeme. »Synthetische Biologie« in diesem Sinn ist synonym für einen möglichen, aber farblosen Begriff »moderne Biotechnologie«. Das BMBF spricht sinngemäß von Biotechnologie 2020+ (Biocom 2013), der britische Nuffield Council on Bioethics (2012) von »emerging biotechnologies«. Synbio i. w. S. baut auf mittlerweile als klassisch oder traditionell bezeichneten molekularbiologischen bzw. gentechnischen Ansätzen (wie dem Einbringen und der Expression einzelner bzw. einiger weniger Gene oder einfachen Formen der Stoffwechselbeeinflussung von Organismen, dem sogenannten »Metabolic Engineering«) auf und überlappt teilweise mit diesen (König et al. 2013; Nielsen/Keasling 2011). Aber auch Synbio i. w. S. führt über solche Ansätze, bei denen typischerweise nur einzelne existierende biologische Funktionen zwischen Organismen übertragen oder vorhandene Stoffflüsse in einem natürlichen Produktionsstamm hin zu dem gewünschten Produkt verbessert werden, deutlich hinaus. So werden mittlerweile (in bekannten Organismen) neuartige und zunehmend komplexe biologische Funktionen erzeugt (wie neue Synthesewege zur Herstellung von Chemikalien oder genetische Schaltkreise, sogenannte »genetic circuits«, für neue sensorische und regulatorische Funktionen; Beispiele in Kap. III.1 bis III.5). Dabei spielen vermehrt computergestützte Design- und Modellierungsprozesse eine Rolle (Fong 2014; Huynh/Tagkopoulos 2014; Nielsen 2011). Die in jüngster Zeit entwickelten Methoden des sogenannten »Genome Editing« (u. a. CRISPR/Cas, Kap. IV.1.2) wurden bisher noch kaum unter dem Label Synbio behandelt, weil ihr Innovationspotenzial sich nicht so sehr aus einer grundlegend neuen Herangehensweise für den umfassenden Umbau von Organismen ableitet, sondern aus der Einfachheit und Geschwindigkeit, mit der präzise und zielgerichtete Veränderungen an Genomen möglich sind (Kap. IV.1.2). Dies könnte sich jedoch bald ändern (Kap. VII).

Synthetische Biologie im engeren Sinn wird von einer eher kleinen Zahl von Wissenschaftlern vorangetrieben – darunter sehr prominente Protagonisten der Genomforschung wie Craig Venter und George Church, welche die zukünftigen Möglichkeiten und Potenziale zum Teil äußerst medienwirksam bewerben (Kap. V.1.1).

Das Synbio-Forschungsfeld wurde in der Anfangsphase stark von (Bio-)Ingenieuren am MIT und von Gruppen an der Westküste der USA, vor allem an der University of California (UC Berkeley) geprägt (hierzu und zum Folgenden Engelhard/Hagen 2012, S. 14). 2003 wurde vom MIT der jährliche Wettbewerb »International Genetically Engineered Machine competition – iGEM«[1] ins Leben gerufen, bei dem Studentengruppen um die originellsten und zukunftsweisendsten Projekte unter Nutzung und Fortentwicklung von »biologischen Teilen«, den sogenannten »Biobricks«, konkurrieren. Während 2006 lediglich ein Team aus Deutschland, von der Universität Freiburg, teilnahm (von 32 weltweit), waren es 2014 bereits 13 deutsche Teams (von 245 weltweit). Inzwischen zählt iGEM zu den wichtigsten Maßnahmen der Nachwuchsförderung im Bereich Synbio und vermittelt als Sozialisationsinstanz Orientierungen wie pragmatisches, lösungsorientiertes Denken, Offenlegung und Austausch von Ergebnissen sowie ein starkes Gemeinschaftsgefühl.

---

1 http://ung.igem.org

Das ursprüngliche sehr theoretische Konzept des »engineering of biology« (Endy 2005) wurde im Lauf der Zeit stärker auf biologische Realitäten ausgerichtet –als Folge einer engeren Zusammenarbeit zwischen Biologen und Ingenieuren. Praxiserprobte forschende Molekularbiologen betonten dabei, dass sie viele der vermeintlich neuen Herangehensweisen und Prinzipien schon seit Langem anwenden, aber mit deutlich mehr Erfahrung mit den praktischen Problemen der Umsetzung und einer etwas nüchterneren sprachlichen Rahmung.[2]

In vielen der einleitend erwähnten TA- und anderen Forschungsprojekten (Kap. I) wurde sich umfassend mit wissenschaftstheoretischen Fragen nach dem Wesen der Synbio befasst, darunter der Einfluss des Ingenieurdenkens sowie die Pass- und Leistungsfähigkeit der Ingenieurprinzipien Standardisierung, Abstraktion und Entkopplung. Auch von Gleich et al. (2012) behandelten Fragen des Umgangs mit der Komplexität sowie dem Rauschen in biologischen Systemen intensiv in ihrem Gutachten, während Engelhard und Hagen (2012) die Bedeutung von Disziplinen, ihren Forschungskulturen und ihrer Zusammenarbeit untersucht haben. Insgesamt betrachtet wurde aber deutlich, dass angesichts des Anliegens des vorliegenden Berichts – nämlich einer möglichst politikrelevanten Aufarbeitung des Themas – eine ausführliche Darstellung dieser (in vieler Hinsicht vorrangig akademischen) Fragen weder notwendig noch sinnvoll erschien, sondern an dieser Stelle auf die Publikationen der großen interdisziplinären deutschen TA-Projekte der vergangenen Jahre verwiesen werden kann (Engelhard 2015; Giese et al. 2014; Köchy/Hümpel 2012).

Ob die anvisierten Resultate der Synbio i. e. S., also weitgehend »künstliche«, tatsächlich »ingenieurhaft« (de novo) konzipierte und produzierte Organismen bzw. (»bioartige«) Systeme jemals eine große Bedeutung für Wirtschaft und Gesellschaft erlangen, ist derzeit nicht verlässlich absehbar. Die Forschungsarbeiten an komplett künstlichen, »bottom up« hergestellten Zellen/Organismen oder an »top down« fundamental genetisch und biochemisch umgebauten natürlichen Zellen befinden sich in so frühen Stadien, dass unklar ist, ob sie wirklich in Zukunft für eine effiziente, zuverlässige und sichere »biobasierte« Produktion genutzt werden können. Technikfolgenabschätzung kann hierzu keine sinnvolle Potenzialanalyse, sondern lediglich ein »Vision Assessment« (Grunwald 2013) vornehmen. Dabei werden Zukunftsszenarien, die auf Basis visionärer Anwendungen entworfen werden, u. a. auf ihre Plausibilität, ihre nötigen Voraussetzungen und Implikationen überprüft und können dann hinsichtlich ihrer Erwünschtheit mit gesellschaftlichen Akteuren debattiert werden (z. B. Bensaude-Vincent 2013b; Hilgartner 2012; Kastenhofer 2013). Die mögliche Funktion solcher Aktivitäten wird in Kapitel V.2 diskutiert.

Sowohl für die »praktische« Forschungs- und Innovationspolitik als auch für die Gesellschaft als Ganzes ist »Synthetische Biologie im weiteren Sinne« als Synonym für die nächsten Stufen der Anwendungen biowissenschaftlicher Erkenntnisse und Technologien gegenwärtig von unvergleich-

---

2 Der Herausgeber des FEMS Microbiology Letters, Jeffrey A. Cole, hat die Tendenz zu sprachlicher Überhöhung in einem Editorial unter der Überschrift »Synthetic biology: old wine in new bottles with an emerging language that ranges from the sublime to the ridiculous?« markant zusammengefasst (Cole 2014): »Some synthetic biotechnologists advocate the introduction of standardisation into their procedures, presumably to facilitate process validation by regulatory authorities. This has led to the introduction of a plethora of engineering jargon into biology. Geneticists used to clone genes into vectors and express the gene in a microbial host. With the arrival of biochemical engineers onto the synthetic biology scene, this has now been translated into *›the engineering of biobricks from the toolbox by rational design for production in the chassis of the platform used for benchmarking.‹* It is for the reader to judge whether this has taken us from the sublime to the ridiculous.«

lich größerer Bedeutung. Entscheidend sind dabei die absehbaren, konkreten Nutzen- und Risikopotenziale zukünftiger Anwendungen. Mögliche Abgrenzungsfragen hingegen – beispielsweise, ob ein neuartiger mikrobieller Produktionsorganismus für die industrielle Biotechnologie, ein Bakterium zur Bodensanierung oder ein Gentherapieverfahren »noch mit konventioneller Gentechnik« oder »schon mit Synthetischer Biologie« erzeugt wurde – sind für die politikberatende TA eigentlich nur dann von konkretem Interesse, wenn damit relevante regulative Fragen verbunden sind (beispielsweise, ob die bestehenden Regeln und Instrumente die angewandten Verfahren noch erfassen; vgl. hierzu Kap. IV.1).

Im Folgenden wird die Basisunterscheidung von Synthetischer Biologie im engeren und im weiteren Sinn insbesondere zur Einordnung und Relevanzeinschätzung vorhandener Aussagen und Stellungnahmen zu den Potenzialen und Perspektiven der Synbio eingesetzt. Dabei wird deutlich, dass mit der Synbio i. e. S. zwar die weiter reichenden Visionen, ethischen/moralischen Bedenken und auch Risikofragen verbunden sind, dass aber mit der Synbio i. w. S. kurz- und mittelfristig bereits drängende, konkrete Fragen wie auch weitere Themen von potenziell grundsätzlicher gesellschaftlicher Bedeutung verknüpft sind, z. B. zu den Perspektiven der Do-it-yourself-Biologie als Ausdruck einer neuen Form der »Bürgerforschung« (Kap. VI).

# STAND VON FORSCHUNG, ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG III.

Obwohl sich die Synbio i. e. S. aller Voraussicht nach noch länger im Bereich der Grundlagenforschung bewegen wird und sich auch die meisten Ansätze der Synbio i. w. S. noch in eher frühen Entwicklungsphasen befinden, sind die Erwartungen an die zukünftige Nutzung in den vergangenen Jahren stark gewachsen. Dies liegt nur zum Teil an den eigentlichen Forschungserfolgen und Anwendungsfortschritten – zwei weitere Triebkräfte sind mindestens ebenso bedeutend: zum einen die intensive Ausschau nach neuen, fundamentalen Technologieschüben durch Analysten aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft und zum anderen der wachsende Problemdruck beim Umbau der Industrieproduktion auf die Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Dass eine solche »Bioökonomie« auf Dauer notwendig ist, wird kaum angezweifelt. Umstritten jedoch sind die Wege dorthin, welche Methoden und Technologien genutzt werden und welche Akteure und Strategien (z. B. auch der Konsumreduktion) eine besondere Rolle spielen sollen (u. a. BMBF 2014b; BMEL 2014; Daniel/Reisch 2014; Ober 2014a). Eine fundamentale Frage lautet, welche Stoff- und Energiemengen dauerhaft und sozial gerecht, d. h. nachhaltig auf der Erde produziert werden können.

Die Entwickler und Befürworter der Synbio erwarten bzw. erhoffen, dass sie dieser Entwicklung in Richtung Bioökonomie wichtige Impulse geben können, indem mithilfe der Synbio einige der biologischen Prozessen innewohnenden Begrenzungen überwunden bzw. zumindest ausgedehnt werden können. Anwendungsmöglichkeiten für Methoden und Verfahren der Synbio bestehen grundsätzlich in allen Industriesektoren, die fossile Kohlenstoffquellen (Erdöl, Erdgas) oder biologisches Ausgangsmaterial (nachwachsende Rohstoffe/Biomasse) verarbeiten oder die biologisch wirksame Stoffe herstellen (z. B. Arzneimittel). In der Perspektive der Synbio i. w. S. geht es dabei um eine schrittweise Fortentwicklung von bereits seit Längerem verfolgten biotechnologischen Strategien und Verfahren mit dem Ziel verbesserter Produktionsorganismen, effizienterer Umwandlungs- und Syntheseverfahren sowie neuer (mikro)biologischer Syntheseverfahren für Naturstoffe oder auch nichtnatürliche Chemikalien. Sprunghafte technologische und sozioökonomische Veränderungen sind davon nicht notwendigerweise zu erwarten, aber auch durch die Summe einer Vielzahl einzelner, kleinerer Fortschritte kann die Umstellung auf eine nachwachsende Rohstoffbasis einen starken Schub erhalten – und die mit verbundenen Herausforderungen dringlicher machen.

Die Erwartung fundamentaler Neuerungen hingegen wird (wenn überhaupt) mit synthetischen Produktionsorganismen oder -verfahren i. e. S. verknüpft, die auf komplett neukonstruierten synthetischen Funktionen oder gar weitgehend synthetischen Organismen beruhen. Solche Funktionen könnten Synthesewege sein, für die es in der Natur kein Vorbild gibt und mit denen dann völlig neuartige Arzneimittel, Energieträger oder »Synbio-Materialien« mit überlegenen Eigenschaften gegenüber herkömmlichen Werkstoffen produziert werden könnten. Auch wenn es erste Beispiele für die Herstellung von Organismen mit gänzlich neuartigen Stoffwechselwegen gibt (Kap. III.1), sind die mit weitgehend synthetischen Organismen verbundenen Szenarien derzeit eine Vision, deren Realisierung unabsehbar ist. Die Funktion visionärer Szenarien in der gesellschaftlichen Debatte über mögliche »Zukünfte« wird in Kapitel V.2 behandelt, während bei der folgenden Betrachtung absehbare Entwicklungs- und Anwendungspotenziale im Vordergrund stehen.

### SCHWIERIGE MARKTEINSCHÄTZUNG IN FRÜHEN STADIEN

Eine Marktschätzung aus dem Jahr 2011 ging von einem globalen Markt für Synthetische Biologie von rund 1,1 Mrd. US-Dollar im Jahr 2010 aus und erwartete eine Steigerung auf 10,8 Mrd. US-Dollar bis zum Jahr 2016 (BCC Research 2011). Die größten Potenziale wurden dabei für die unterstützenden Technologien für die Synthetische Biologie, wie z. B. Gensynthesen, gesehen. Der Anteil »echter Anwendungen« der Synthetischen Biologie wurde als relativ gering (unter 10 %) eingeschätzt. Eine Marktstudie aus dem Jahr 2013 prognostizierte mit 16,7 Mrd. US-Dollar für das Jahr 2018 eine ähnliche Entwicklung (Transparency Market Research 2013[3]), eine weitere vom Mai 2014 schätzte den Markt für das Jahr 2020 dann immerhin schon auf 38,7 Mrd. US-Dollar (Allied Market Research[4]). Als vielversprechendster Markt wird Europa aufgrund der starken öffentlichen Forschungsförderung betrachtet, während in Asien die große Bevölkerungszahl und der entsprechende Konsumbedarf als dominante Treiber der weiteren Entwicklung angesehen werden.

Ungeachtet der sehr großen Unsicherheiten aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums sowie des großen Einflusses, der von der jeweiligen Systemabgrenzung ausgeht (Welche Unternehmen/Produkte werden zur Synbio gezählt?), sprechen die Zahlen dennoch für eine grundsätzlich gemäßigte Erwartungshaltung unter Analysten an das kurz- bis mittelfristige ökonomische Anwendungspotenzial der Synbio – angesichts der Gesamtmärkte für Chemie, Pharmazie, Lebensmittel und Kosmetik von jeweils mehreren Billionen Euro. Für Investoren interessant sind allerdings die mittelfristig erwarteten hohen Wachstumsraten (OECD 2014, S. 33).

Als Innovationsindikatoren für den aktuellen Entwicklungsstand eines aufkommenden Forschungs- und Technologiefelds bieten sich insbesondere Patentanmeldungen an, die in entsprechenden Datenbanken weltweit verfügbar sind. Doren et al. (2013) kamen bei einer Patentanalyse zu dem Ergebnis, dass sich die Synthetische Biologie in einem frühen Entwicklungsstadium befindet, das durch grundlagenorientierte Forschungsaktivitäten gekennzeichnet ist. Vergleicht man den Zeitverlauf der Patentanmeldungen in der Synthetischen Biologie mit anderen wissensbasierten Technologien und folgt der Argumentation von Schmoch (2007), dass sich wissensbasierte Technologien häufig nach einem ähnlichen Muster entwickeln, so ist anzunehmen, dass sich die Synthetische Biologie in einer nächsten Phase stärker in Richtung Anwendungsorientierung entwickeln wird. Auch nach Einschätzung von durch Reiß und van Doren im Rahmen dieses TA-Projekts befragten Experten aus Industrie und Forschung erscheint die Prognose realistisch, dass sich das volle Anwendungspotenzial der Synthetischen Biologie frühestens in ca. zehn Jahren entfalten kann, ohne dass der Umfang genauer vorhergesagt werden kann.

Zu erwarten ist, dass insbesondere im chemischen Sektor die Verfahren und Produkte der Synthetischen Biologie für die Herstellung sowohl von einfachen Massenchemikalien als auch von komplexeren chemischen Verbindungen genutzt werden. Das US-amerikanische Unternehmen Lux Research, Inc., erwartete 2009, dass mittel- bis langfristig bis zu einem Fünftel des globalen Umsatzes der chemisch-pharmazeutischen Industrie (dieser betrug im Jahr 2014 laut dem Verband der chemischen Industrie 4,2 Billionen Euro; VCI 2015, S. 120) auf Methoden der Synthetischen Biologie basieren wird (Bünger et al. 2009). Neben dem Chemiesektor (Kap. III.1) wird der Energiesektor als ein wichtiges Anwendungsfeld eingeschätzt. Hier geht es insbesondere um die Herstellung von

---

3 www.prweb.com/releases/2013/7/prweb10902465.htm (20.11.2015)

4 www.alliedmarketresearch.com/synthetic-biology-market (20.11.2015)

Biokraftstoffen (Kap. III.2). Weitere wesentliche Innovations- und Anwendungsfelder sind im Gesundheitssektor die Entwicklung neuer Diagnostika und Therapeutika (Kap. III.3), im Umweltbereich neuartige Biosensoren und Verfahren der Dekontamination verunreinigter Flächen (Kap. III.4) sowie die Produktion sogenannter Biomaterialien (Kap. III.5). Die folgenden Kapitel geben einen Überblick zu diesen Bereichen, wobei der Chemiesektor eher knapp behandelt wird, da der Wissensstand hierzu ausführlich im TAB-Innovationsbericht »Weiße Biotechnologie – Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie für nachhaltiges Wirtschaften« (TAB 2015a u. 2015b) beschrieben ist.

## Chemische Produktion 1.

Fast alle Grundchemikalien und daraus hergestellte Materialien (wie Kunststoffe, Gummi, Lösungsmittel, Kleb- oder Treibstoffe), genauso wie die meisten Fein- und Spezialchemikalien (einschließlich Aroma- oder Duftstoffe), basieren auf Kohlenstoffverbindungen, die aus fossilen Ressourcen (hauptsächlich Erdöl) gewonnen werden. Biobasierte Chemikalien aus biotechnischer Produktion mithilfe speziell selektierter oder genetisch veränderter Mikroorganismen und Pflanzen machen bislang nur ca. 6 % des Gesamtchemiemarkts aus (TAB 2015a). Durch eine Steigerung der biobasierten Chemieproduktion (auch industrielle oder Weiße Biotechnologie genannt) soll zum einen Erdöl eingespart und somit die Abhängigkeit davon verringert werden (Hermann et al. 2007; Tang/Zhao 2009). Zum anderen können biobasierte Produktionswege Reduktionspotenziale beim Energieverbrauch und damit beim Ausstoß von Treibhausgasen (wie $CO_2$) aufweisen (Dornburg et al. 2004; Groot/Borén 2010; Hermann et al. 2007 u. 2011). Ein weiterer Vorteil kann in der einfacheren biologischen Abbaubarkeit der Endprodukte liegen, insbesondere bei der Verwendung als Kunststoffe (Keshavarz/Roy 2010; Tang/Zhao 2009).

Prinzipiell können durch biotechnologische Verfahren sowohl die Produktionsprozesse als auch die Produkte selbst verbessert werden. Dabei können Eigenschaften wie Wiederverwertbarkeit, Stabilität, Bioabbaubarkeit, Sicherheit oder Effizienz optimiert werden. Bereits seit längerer Zeit werden mit gentechnischen Methoden Synthese- und Stoffwechselwege – also der Metabolismus – von Mikroorganismen und teilweise von Pflanzen verändert. Die bisherigen Verfahren dieses Metabolic Engineering, die lediglich auf der Veränderung einer geringen Zahl von genetischen Elementen beruhten und oft der Optimierung bereits in natürlichen Organismen vorkommender (nativer) Stoffwechselwege dienten, sind allerdings an Grenzen gestoßen; insbesondere wenn Substanzen hergestellt werden sollen, die nur in Spuren oder auch gar nicht von natürlichen Organismen synthetisiert werden (Nielsen 2011; Nielsen/Keasling 2011). Von der Synthetischen Biologie werden nun substanzielle Fortschritte dabei erwartet, das Potenzial der Biotechnologie in der chemischen Industrie besser ausschöpfen zu können, indem gezielter und verlässlicher vorhersagbare, berechenbare und schnellere Herstellungsprozesse für Massen- und Feinchemikalien entwickelt werden.

Im Labormaßstab konnte bereits eine Reihe neuer biobasierter Produktionswege für chemische Substanzen mithilfe gezielt geänderter Organismen erfolgreich etabliert werden. Hierzu wurden verschiedene Gene aus unterschiedlichen Organismen verwendet und die so konstruierten Produktionswege zusätzlich durch Veränderungen der Aktivität von nativen Genen des Empfängerorganismus optimiert. In einigen Fällen werden solche Produktionswege bereits im kommerziellen oder präkommerziellen Maßstab genutzt. Dazu gehören (ausführlich TAB 2015a)

> biologisch abbaubare Kunststoffe (»bioplastics«), wie beispielsweise Polylactide (PLA) oder Polyhydroxyalkanoate (PHA) (Mohammed/Vermaas 2010; Somleva et al. 2008; Zhou et al. 2005), sowie
> in großem Maßstab benötigte Grundchemikalien, wie 1,3-Propandiol (Emptage et al. 2003; Tang et al. 2009) und 1,4-Butandiol (Burk et al. 2010; Yim et al. 2011) für die Herstellung von Kunststoffen und Lösungsmitteln oder Isobuten (Marliere 2010), Isoprenoide und Farnesen (Anthony/Newman 2010; Martin et al. 2003; Mendez et al. 2009) für die Produktion verschiedener Polymere sowie von Gummi, Treibstoffen oder Pharmaka.
> Auch Aroma- und Duftstoffe für die Lebensmittel-, Kosmetik- und Reinigungsmittelindustrie werden (seit Langem) teils mit gentechnologischen Verfahren hergestellt. Der Ersatz chemischer Herstellungsverfahren in diesem Produktbereich durch Synbio-Ansätze (wenn auch nur i. w. S.) ruft aufgrund der größeren öffentlichen Sensibilität viel stärkere Reaktionen von Umweltgruppen und Medien hervor als bei der sonstigen chemischen Stoffproduktion.

Insbesondere die Herstellung von 1,4-Butandiol mithilfe von E.-coli-Stämmen ist ein Beispiel hin zur Synbio i. e. S.: 1,4-Butandiol ist eine nichtnatürliche Chemikalie, die von keinem bekannten Organismus hergestellt wird; ihre »biobasierte« Herstellung erforderte deshalb einen Syntheseweg ohne »natürliches« Vorbild. Der entsprechende Syntheseweg wurde auf der Basis von Kenntnissen über Stoffwechselwege und Enzymaktivitäten von E. coli und einer Reihe anderer Organismen in silico modelliert und damit weitgehend »rational designt« (Nielsen 2011; Yim et al. 2011).

Neben solchen Ansätzen zur Herstellung von Chemikalien durch gentechnisch veränderte Bakterien oder Hefen, die als Nährsubstrate Pflanzenzucker (meist aus Mais oder Zuckerrohr) benötigen, wurden im Labormaßstab auch Ansätze zur (direkten) Synthese von Isoprenoiden und anderen chemischen Verbindungen in entsprechend gentechnisch veränderten *Mikroalgen* (Mendez et al. 2009; Mohammed/Vermaas 2010; Somleva et al. 2008) beschrieben (vgl. hierzu auch Kap. III.2.1).

Ein dritter Ansatzpunkt für gezielte Verbesserungen ist die Ausbeute bzw. das »downstream processing« (d. h. die Gewinnung des gewünschten Produkts). Ein Beispiel hierfür ist die Steigerung der Herstellungseffizienz von Seidemonomeren in Mikroorganismen durch die Etablierung von »Exportmechanismen« in das umgebende Medium. Hierzu ist es erforderlich, die Proteine mithilfe eines Sekretionssystems auf effiziente Weise durch die bakteriellen Membranen zu schleusen. In bestimmten Salmonellenbakterien wurde ein geeignetes Sekretionssystem identifiziert, an das mit Methoden der Synthetischen Biologie die für die Expression der Seidenproteine erforderlichen Gene gekoppelt werden konnten (Widmaier et al. 2009).

## ZUM ZUKÜNFTIGEN POTENZIAL BIOBASIERTER CHEMIKALIEN

In Bezug auf eine biobasierte, industrielle Produktion von Grundchemikalien umfassen die mit den beschriebenen Ansätzen verbundenen Potenziale und Chancen vor allem mehr Umweltfreundlichkeit und Nachhaltigkeit, verglichen mit bisherigen, auf fossilen Ressourcen basierenden Herstellungsprozessen. Verringert werden könnten der Verbrauch und die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen (Kohle, Öl, Gas) sowie der Ausstoß von Kohlendioxid ($CO_2$). Die Resultate verschiedener Studien legen nahe, dass biobasierte Syntheseverfahren tatsächlich zu einer Reduktion des Energieverbrauches und des Ausstoßes von Treibhausgasen führen können (Dornburg et al. 2004; Hermann et al. 2007; Tabone et al. 2010; Yu/Chen 2008). Jedoch können einzelne Umweltbelastungen (z. B.

Karzinogene, Gewässerüberdüngung) bei bestimmten Produktionsprozessen für biologisch abbaubare Kunststoffe höher sein als bei der Herstellung »klassischer« Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen (Tabone et al. 2010).

Ein grundlegender, kritischer Punkt ist die nachhaltige Produktion von Biomasse für die Herstellung von biobasierten Chemikalien in großem Maßstab insbesondere angesichts der seit Jahren verfolgten Ausbaustrategien im Bereich der Bioenergieerzeugung (Kap. III.2). Die resultierende Nutzungskonkurrenzproblematik untereinander, vor allem aber gegenüber der als vorrangig betrachteten Lebensmittelerzeugung wird mittel- und langfristig die wohl größte Herausforderung auf dem Weg zu einer umfassenden Bioökonomie, d. h. einer komplett auf nachwachsenden Rohstoffen und erneuerbarer Energie basierenden Wirtschaft und Gesellschaft darstellen (Kap. III.6).

Im Jahr 2014 rückten zwei Synbio-Chemikalien in den Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit, die in Endverbraucherprodukten eingesetzt werden sollen: ein Palmölersatz aus gentechnisch veränderten Mikroalgen, der in der Waschmittelproduktion verwendet werden soll, sowie der Aromastoff Vanillin aus gentechnisch umgebauten Hefen. Umweltgruppen, allen voran die kanadische ETC Group sowie die US-amerikanischen Friends of the Earth, starteten Aufrufe gegen beide Produkte,[5] mit verschiedenen Schwerpunkten der Begründungen:

Beim Synbio-Vanillin wird befürchtet, dass hierdurch die Lebensgrundlage der Vanillebauern vor allem auf Madagaskar, wo 80 % der weltweiten Vanilleproduktion angesiedelt sind, gefährdet wird (ETC Group 2013b). Diese Befürchtung erscheint allerdings wenig plausibel, da das Synbio-Vanillin des schweizerischen Unternehmens Evolva Holding SA nicht den echten, überaus teuren (und verschiedene weitere Stoffe enthaltenden) Vanilleextrakt ersetzten dürfte, sondern eher eine Alternative zur chemischen Herstellung von Vanillin darstellt. »Vanillegeschmack« bzw. »-duft« in Lebensmitteln und Kosmetika basiert fast ausschließlich auf synthetischem Vanillin. Evolva reklamiert, dass die hefebasierte Vanillinproduktion nicht nur kosteneffizienter, sondern auch ressourcenschonender ist,[6] während Friends of the Earth[7] u. a. auf den umweltnachteiligen Monokulturanbau des Zuckerrohrs (v. a. in Brasilien) hinweisen, woraus das Nährsubstrat (Saccharose) für die Synbio-Hefen gewonnen wird.

Auch bei der Algenölproduktion dient (brasilianisches) Zuckerrohr als Ausgangsstoff. Die Kritik der Umweltgruppen[8] bezieht sich neben der aus ihrer Sicht nichtnachhaltigen Zuckerrohrproduktion auf die Nutzung der Synbio bzw. Gentechnik, die von ihnen grundsätzlich abgelehnt wird. Die Kritik erhält besonderes Gewicht, weil sie sich gegen eine der ältesten und größten Hersteller von Ökowaschmitteln richtet, die Firma Ecover Belgium N. V. Diese will mit dem von dem US-amerikanischen Unternehmen Solazyme, Inc., entwickelten Synbio-Algenöl den Waschmittelgrundstoff Palmöl ersetzen, weil der zunehmende Palmölanbau seit Jahrzehnten, insbesondere in Malaysia, zu massiver Tropenwaldzerstörung geführt hat. Die Umweltgruppen befürworten stattdessen eine Umstellung auf Kokosöl aus nachhaltiger kleinbäuerlicher Produktion.

Obwohl Ecover davon ausgeht, dass die Zuckerrohrproduktion für das Synbio-Algenöl klare ökologische Vorteile habe und die vorgebrachten Argumente zum Teil ungenau, zum Teil irreführend

5 www.foe.org/projects/food-and-technology/synthetic-biology/No-Synbio-Vanilla (20.11.2015)
6 www.evolva.com/ (20.11.2015)
7 www.foe.org/projects/food-and-technology/synthetic-biology/No-Synbio-Vanilla (20.11.2015)
8 www.etcgroup.org/content/groups-call-ecover-and-method-drop-extreme-genetic-engineering-plans (20.11.2015)

seien, hat die Firma auf die Kampagnen der Umweltgruppen reagiert und eine runden Tisch vorgeschlagen.[9] Dieser wurde allerdings nicht von Ecover selbst, sondern von Solazyme als Technologieentwickler (und unter Hinzuziehung eines externen Veranstalters) organisiert. Die ETC Group, Friends of the Earth sowie viele weitere Umwelt-NRO haben die Teilnahme an dem runden Tisch in dieser Form abgelehnt, weil er nicht dazu dient, die Pläne von Ecover – d. h. die Nutzung von Synbio-Rohstoffen zum jetzigen Zeitpunkt – grundsätzlich infrage zu stellen, sondern weil es nur um die möglichst umweltverträgliche bzw. nachhaltige Ausgestaltung geht.[10]

## Energiegewinnung 2.

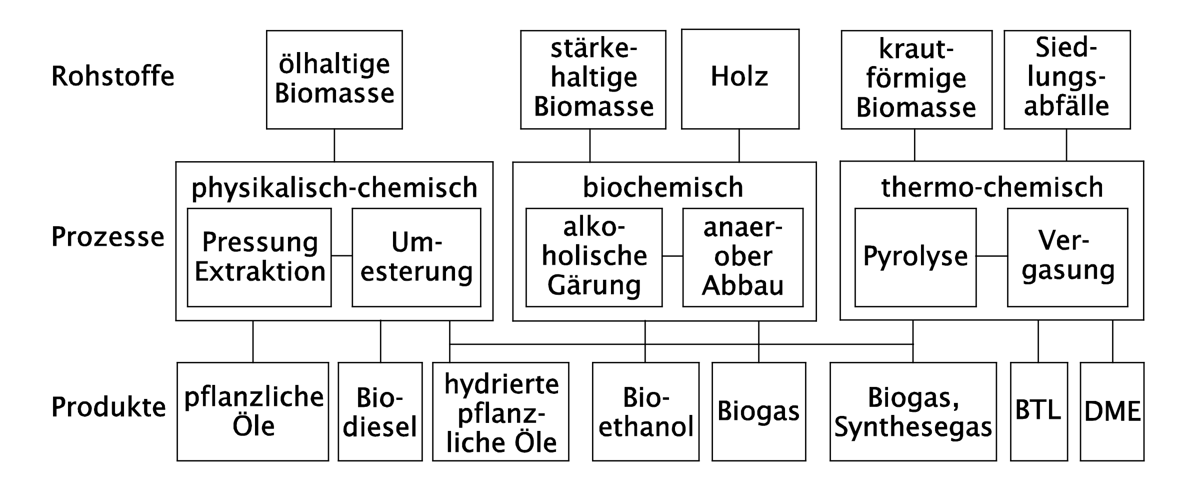
Im Energiesektor werden Anwendungspotenziale der Synthetischen Biologie insbesondere bei der Produktion von Biokraftstoffen oder ihren Vorstufen gesehen. Die Nutzung von Biomasse als Energiequelle ist keine neue Strategie. Schon Rudolf Diesel hatte erste Versuche unternommen, um Bioenergie als flüssige Energiequelle im Industriemaßstab zu nutzen. Traditionell werden von Fettsäuren abgeleitete Moleküle (einschließlich Biodiesel) sowie kurze Alkohole (v. a. Ethanol) aus Fermentationsprozessen (d. h. der Umwandlung organischer Stoffe durch Enzyme – typischerweise in Mikroorganismen) als Biokraftstoffe genutzt. In jüngerer Zeit ist auch die Herstellung von längerkettigen Kohlenwasserstoffen wie Alkanen, Alkenen, oder Isoprenoiden sowie von längerkettigen Aldehyden und Alkoholen mithilfe von Mikroorganismen gelungen. Diese Stoffgruppen weisen höhere Energiedichten, bessere bzw. komplette Mischbarkeit mit fossilen Treibstoffen oder bessere Verbrennungseigenschaften auf (Lee et al. 2008; McEwen/Atsumi 2012).

Biomasse kann in verschiedene Energieformen umgewandelt werden. Eine direkte Umwandlung von Biomasse in Elektrizität kann durch ihre Verbrennung in speziellen Kraftwerken erfolgen. Dabei wird Wasserdampf erzeugt, der Gasturbinen für die Elektrizitätserzeugung antreibt. Häufig jedoch kann die heterogen zusammengesetzte Biomasse nicht direkt für die Verarbeitung in Elektrizitätskraftwerken genutzt werden. Auch der Transport der Rohstoffe zu den Kraftwerken bringt verschiedene Probleme mit sich. Beispielsweise wirkt sich der hohe Wassergehalt der Biomasse negativ auf die Energiebilanz bei den Transportwegen aus. Aus diesen Gründen wird Biomasse häufig in homogenere und energiedichtere Biokraftstoffe umgewandelt. Für diese Umwandlung von Biomasse in Biokraftstoffe können prinzipiell drei Wege unterschieden werden (Abb. III.1; siehe auch TAB 2010, S. 40 ff.):

1. eine physikalisch-chemische Route,
2. die biochemische Konversion und
3. die thermochemische Umwandlung.

9 http://uk.ecover.com/en/why-ecover/algal-oil-the-alternative-to-palm-oil/ (20.11.2015)
10 www.syntheticisnotnatural.com/ecover-roundtable-response-synthetic-biology/ (20.11.2015)

ABB. III.1 VERSCHIEDENE PROZESSE DER BIOENERGIEERZEUGUNG




Eigene Darstellung

Bei der physikalisch-chemischen Umwandlung wird vor allem ölhaltige Biomasse genutzt. Die wichtigsten hierdurch erzeugten Biokraftstoffe sind Biodiesel und verschiedene Ölvarianten (z. B. aus Raps, Sonnenblumen, Ölpalmen). Die biochemische Konversion nutzt insbesondere stärkehaltige Biomasse (v. a. Mais, Zuckerrohr) und Holz als Rohstoffe. Die wichtigsten hieraus resultierenden Biokraftstoffe sind Bioethanol sowie Biogas. Für die thermochemische Umwandlung können verschiedene heterogene Pflanzenbestandteile, aber auch Haushaltsabfallstoffe eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist das (nach wie vor in Entwicklung befindliche) Biomass-to-Liquid-Verfahren (BTL-Verfahren), mit dem bei hohen Temperaturen synthetische Kraftstoffe aus zellulosehaltiger Biomasse (wie Stroh oder Holz) hergestellt werden können.

Alle Verfahrensschritte bergen grundsätzliche Herausforderungen. Zunächst ist es erforderlich, die natürlichen Rohstoffe nachhaltig in ausreichender Menge und in der benötigten Qualität zu produzieren. Dabei stellt sich insbesondere das Problem der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion (ausführlich hierzu TAB 2010, 2012a u. 2015b). Auch ist bei der Umwandlung der biobasierten Rohstoffe in Bioenergieträger die Effizienz der genutzten Prozesse bei Weitem noch nicht befriedigend. Die Qualität der erzeugten Bioenergieträger ist meist nicht ausreichend, sodass zusätzliche Verarbeitungsschritte erforderlich werden und eine direkte Substitution von petrochemisch erzeugten Energieträgern nur selten möglich ist. Der Aufwand für die Aufarbeitung der Energieträger aus den biologischen Rohstoffen beeinträchtigt die Gesamteffizienz und damit auch die Wettbewerbsfähigkeit der Bioenergieerzeugung.

Prinzipiell kann die Synthetische Biologie Lösungsbeiträge zu all diesen Herausforderungen leisten. Ein fundamentaler Ansatz ist, Stoffwechselwege neu zu kombinieren, sodass Synthese- oder Abbauprozesse konstruiert werden können, die in der Natur nicht vorkommen. Darüber hinaus können die bisher genutzten Prozesse auf verschiedene Weise in ihrer Effizienz optimiert werden.

Bei der *Rohstoffbereitstellung* (Kap. III.2.1) birgt die Synthetische Biologie das Potenzial, entsprechende Nutzpflanzen, vor allem aber zur Photosynthese befähigte, sogenannte phototrophe Mikroorganismen wie Blaualgen durch eine Modifikation der betroffenen Stoffwechselwege so zu optimieren, dass möglichst große Mengen an energiereichen Ausgangstoffen synthetisiert und in leicht

verfügbarer Form gespeichert oder ausgeschieden werden. Auf der nächsten Stufe, der *Rohstoffumwandlung* (Kap. III.2.2), erhofft man sich von der Synthetischen Biologie neue Ansätze insbesondere für die Nutzung von Lignozellulose – dem Material, das den weitaus größten Teil der pflanzlichen Biomasse ausmacht und nicht essbar ist (z. B. Stängel und Blätter beim Mais) – für die Bioenergieproduktion, um so eine direkte Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion zu umgehen und gleichzeitig eine in großen Mengen vorhandene Rohstoffquelle zu erschließen.

Die *Umwandlungseffizienz* bzw. die Ausbeuterate bei der Bioenergieerzeugung (Kap. III.2.3) hängt stark davon ab, wie die Balance zwischen der Fitness der Produktionsorganismen und ihrer Fähigkeit, Biokraftstoffe zu produzieren, austariert wird. Hierzu zählt beispielsweise das Umschalten von Wachstum auf Produktion zum richtigen Zeitpunkt. Diese Prozesse werden durch Regelungskreise gesteuert, die mithilfe der Synthetischen Biologie in eine gewünschte Richtung optimiert werden können, ebenso wie das »downstream processing«, d. h. die Gewinnung des gewünschten Produkts. Da die bisher genutzten Bioenergieträger häufig nicht optimal für ihre technische Nutzung geeignet sind, zielt ein weiterer Forschungsansatz darauf ab, *energiereichere*, in jedem Verhältnis mit fossilen Treibstoffen mischbare *Biokraftstoffe* zu produzieren, z. B. längerkettige Alkohole wie Butanol oder Kohlenwasserstoffe wie Alkane und Alkene (Kap. III.2.4)

## Rohstoffbereitstellung 2.1

### SYNTHETISCHE BIOLOGIE IN DER PFLANZENZUCHT?

Es wird erwartet, dass die Herstellung von Biokraftstoffen aus pflanzlichen Rohstoffen in den nächsten Jahren die wichtigste Option für die Biokraftstoffherstellung bleiben wird. Damit ist die Verfügbarkeit geeigneter Rohstoffe eine der zentralen Herausforderungen für die Biokraftstoffherstellung, wobei die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion die grundlegende sozioökonomische und ethische Problematik darstellt (TAB 2010, 2011, 2012a u. 2015b). Handlungsoptionen bestehen in einer Beschränkung der Rohstoffgewinnung auf Landstriche, die für die Nahrungsmittelproduktion nicht geeignet sind, sowie einer Nutzung alternativer Rohstoffquellen. Grundsätzlich wird eine möglichst ressourcenschonende Ertragsoptimierung der landwirtschaftlichen Produktionsprozesse angestrebt, um global wie regional ausreichende Biomassemengen in umweltverträglicher Art und Weise für die unterschiedlichen Verwendungszwecke bereitstellen zu können.

Während insgesamt große Potenziale auch bei der Verbesserung von Anbautechnik und -verfahren ebenso wie im Nacherntebereich gesehen werden (TAB 2011), betreffen potenzielle Beiträge der Synthetischen Biologie eine Optimierung der genetischen Basis von Rohstoffpflanzen. Die möglichen Ziele unterscheiden sich prinzipiell nicht von denen konventioneller Pflanzenzucht (Becker 1993, nach Meyer et al. 2013, S. 95) und betreffen die *Ertragssteigerung* (im eigentlichen Sinn), die *Ertragssicherung* (d.h. die Resistenz bzw. Toleranz gegenüber ertragsgefährdenden Einflüssen wie Schädlingen und Krankheiten oder abiotischen Stressfaktoren wie Trockenheit, Versalzung und Hitze) sowie die jeweiligen *Qualitätseigenschaften*, worunter auch eine Optimierung bzw. Veränderung der jeweiligen Inhaltsstoffe verstanden wird.

Allerdings ist eine umfassende »Neugestaltung« von Pflanzen(zellen) derzeit nicht absehbar. Synbio-Ansätze im Bereich der Pflanzenzucht bzw. -optimierung beschränken sich derzeit auf ein um-

fassenderes Metabolic Engineering, repräsentieren also Synbio i. w. S. In diesem Sinne können bereits seit Längerem verfolgte, komplexere gentechnische Züchtungsvorhaben, wie der mit Provitamin A angereicherte sogenannte »Goldene Reis« (TAB 2008b, S. 55 f.) oder neuartige Pharma- und Industriepflanzen (TAB 2005), als direkte Vorläufer der Synbio eingeordnet werden.

Auf eine umfassende Darstellung gentechnischer Züchtungsansätze für den Biomasse- und -energiebereich wird an dieser Stelle verzichtet. Seit den einschlägigen TAB-Berichten von 2005 und 2007 hat sich relativ wenig getan; die einzige, in den USA und Kanada, nicht aber in Europa zugelassene »gentechnisch gezüchtete« Energiepflanze (der sogenannten »ersten Generation«, bei der nur die öl- oder stärkehaltigen Pflanzenteile genutzt werden) ist ein Mais mit erleichtertem Stärkeaufschluss für die Ethanolgewinnung (TAB 2005, S. 162 f., u. 2007, S. 84; transGEN 2015a). Hierfür war allerdings lediglich die Übertragung eines einzigen Fremdgens nötig, ein klassischer Fall »einfacher« Gentechnik also. Bei den Energiepflanzen der sogenannten zweiten und dritten Generation (zur Ganzpflanzennutzung bzw. mit optimierten Inhaltsstoffen) sind hingegen nach wie vor keine fortgeschrittenen Entwicklungen bekannt (Meyer et al. 2013; Müller-Röber et al. 2015, S. 330; TAB 2007, S. 82 ff.; transGEN 2015d).

Ob umfassendere Eingriffe in das pflanzliche Genom in Zukunft zu praxisrelevanten, anbaufähigen »synthetischen« Sorten führen werden, ist ungewiss. Seit einigen Jahren konzentrieren sich Forschungsaktivitäten neben der Weiterentwicklung gentechnischer Verfahren auch auf Ansätze des »Smart breeding« (»selection with markers and advanced reproductive technologies«) (Meyer et al. 2013; Müller-Röber et al. 2015, S. 317 f.), die sehr präzise genetische Analysen mit Methoden der »klassischen« Pflanzenzüchtung kombinieren, um das in den Pflanzenarten und -sorten vorhandene Potenzial optimal und zielgenau zu nutzen – aber eher im Sinn einer wissensbasierten Unterstützung und Lenkung natürlicher Prozesse und Mechanismen und weniger aufgrund ingenieurartiger Neuzurichtung (im Sinn einer Synbio i. e. S.).

Frühere Versuche, die Inhaltsstoffe von Pflanzen(zellen) mithilfe der Gentechnik quantitativ stark zu erhöhen, waren in vielen Fällen nicht so erfolgreich, wie erhofft (TAB 2005). Artfremde Verbindungen, wie z. B. pharmakologische Stoffe, werden ganz überwiegend aus Pflanzenzellkulturen gewonnen, ein Freilandanbau entsprechender transgener Pflanzen wird nach wie vor nicht ernsthaft verfolgt (Biosicherheit 2012a; Müller-Röber et al. 2015, S. 334 ff.). In jüngster Zeit allerdings wird aufgrund der enormen Entwicklung bei den sogenannten Genome-Editing-Verfahren (CRISPR/Cas etc., Kap. IV.1.2), die eine deutlich schnellere und gezieltere Veränderung auch von Genomen höherer Tiere und Pflanzen erlauben, ein neuer Schub bei der Anwendung der Gentechnik in der Pflanzenzucht erwartet, zumal diskutiert wird, dass die Resultate eventuell nicht als gentechnisch veränderte Organismen behandelt, d. h. zugelassen und gekennzeichnet werden müssen (transGEN 2015c).

Ein Beispiel, das im Kontext der Synbio darüber hinaus eine besondere Rolle spielt, ist die Entwicklung selbstleuchtender Zierpflanzen. Wenn auch sozioökonomisch fraglos von geringer aktueller und zukünftiger Bedeutung, hat vor allem ein durch Crowdfunding finanziertes Projekt sowohl die Sicherheitsdebatte (Kap. IV.1) als auch die Frage nach den Motiven der beteiligten Akteure und ihrer Verantwortung (Kap. VI.5) stark angeregt.

## BIOENERGIEROHSTOFFE AUS PHOTO- UND ELEKTROTROPHEN MIKROORGANISMEN

Ein alternativer Ansatz für die Erzeugung von Biokraftstoffen ist die direkte Produktion der entsprechenden Verbindungen aus $CO_2$ durch phototrophe, d. h. zur Photosynthese befähigte Mikroorganismen (und damit unter Umgehung der pflanzlichen Fixierung von $CO_2$ in organischen Rohstoffen und anschließender mikrobieller Umwandlung; hierzu Kap. III.2.2 bis III.2.4).

### WASSERSTOFF

Die Produktion von Wasserstoff durch Wasserspaltung mithilfe der Sonnenenergie unter Nutzung speziell veränderter Mikroorganismen oder biomimetischer Katalysatoren (d. h. technische Katalysatoren, die Funktionsprinzipien von Enzymen nutzen) könnte in der Zukunft eine technisch nutzbare Option darstellen (DFG et al. 2009; Leopoldina 2013, S. 73 ff.). Die grundsätzliche Machbarkeit für die lichtgetriebene Wasserstofferzeugung mittels bestimmter Cyanobakterien (Blaualgen) wurde in den vergangenen Jahren demonstriert (Ellis/Goodacre 2011). Mithilfe von Metabolic Engineering konnten Cyanobakterienstämme so verändert werden, dass sie eine fünffache Steigerung der Wasserstoffproduktion im Vergleich zum Wildtyp aufweisen (Mc Neely et al. 2010).

### ALKOHOLE

In einem anderen Ansatz wurden Blaualgen dazu genutzt, photosynthetisch aus Kohlendioxid bestimmte Aldehyde herzustellen, die dann relativ leicht zu Alkoholen (beispielsweise Isobutanol) reduziert werden können. Dabei wurden die Organismen unter Verwendung von Genen aus verschiedenen Organismen gentechnisch so verändert, dass sie Isobutyraldehyd und Isobutanol direkt aus $CO_2$ herstellen können und durch Überexpression einen höheren Gehalt des $CO_2$-fixierenden Enzyms Rubisco enthielten (Atsumi et al. 2009). Das Endprodukt Isobutanol kann sowohl direkt als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren wie auch als chemische Grundsubstanz genutzt werden.

### FETTSÄUREN UND ALKANE

Verschiedene Mikroalgen können mithilfe von Lichtenergie $CO_2$ direkt in Speicherlipide (wie z. B. Fettsäuren oder Alkane) umwandeln. Die Ausbeuten der natürlichen Organismen sind jedoch oft zu gering, um sie wirtschaftlich nutzen zu können. Daher wird auch für diese Verbindungen versucht, mittels verschiedener Metabolic-Engineering-Ansätze die Produktionsraten oder durch Optimierung der lichtabsorbierenden Moleküle die Effizienz der Photosynthese zu erhöhen (Conlan et al. 2009; Robertson et al. 2011; Service 2011; Wackett 2011).

### ELEKTROKRAFTSTOFFE

Eine weitere Option ist die Produktion sogenannter Elektrokraftstoffe. Darunter werden flüssige Biokraftstoffe verstanden, die ohne Sonnenlicht direkt aus Kohlendioxid unter Nutzung von Elektrizität hergestellt werden. Dabei wird die Fähigkeit mancher Mikroorganismen ausgenutzt, Elektronen aus dem Außenraum aufzunehmen und für interne Reduktionsprozesse zu nutzen (sogenannte elektrotrophe Organismen) (Li et al. 2012; Rabaey et al. 2011).

Die Produktion von Elektrokraftstoffen wird beispielsweise vom US-amerikanischen Start-up Ginkgo Bioworks™ mit Unterstützung des U.S. Department of Energy (DoE) durchgeführt. Dabei

werden u. a. zwei Strategien verfolgt: zum einen die Kopplung von Mikroorganismen mit Solarzellen und zum anderen der Einsatz von Mikroorganismen, die die erforderlichen Elektronen aus anorganischen Substanzen wie beispielsweise Eisensulfiden nutzen können.[11]

## Umwandlung von Lignozellulose 2.2

Lignozellulose, ein zentraler Strukturbestandteil verholzter Pflanzen, kommt in großen Mengen als natürlicher Rohstoff vor und kann nur über die Tierfütterung für die Nahrungsmittelproduktion genutzt werden, da er für Menschen unverdaulich ist. Die Verwendung von Lignozellulose für die Herstellung von Biokraftstoffen könnte die Nutzungskonkurrenzproblematik insbesondere dann reduzieren, wenn sie von Flächen stammt, die ansonsten nicht für die Nahrungsmittelproduktion verwendet werden, oder wenn sie aus Rest- und Abfallstoffen gewonnen wird.

Für die Kraftstoffgewinnung sind vor allem zwei Herausforderungen zu lösen: Zuerst muss die schwer abbaubare Lignozellulose in ihre Zuckerbestandteile zerlegt werden, danach muss das entstehende Gemisch aus Pentosen und Hexosen (Zucker mit 5 bzw. 6 Kohlenstoffatomen) durch Fermentationsprozesse in die eigentlichen Biokraftstoffe umgewandelt werden. Beide Prozesse laufen mit natürlich vorkommenden Organismen – wenn überhaupt – nur sehr langsam ab, konnten aber in den letzten Jahren durch den Einsatz verschiedener Verfahren teilweise deutlich verbessert werden.

Forschungsarbeiten zum mikrobiellen *Abbau der Lignozellulose* haben in den letzten Jahren gezeigt, dass hierfür spezielle biologische Strukturen verantwortlich sind. Es konnten sogenannte Zellulosomen identifiziert werden, d. h. Strukturen, die einen direkten Zellkontakt zwischen Mikroorganismus und Substrat ermöglichen und so den Substratabbau erleichtern (Gilbert 2007). Außerdem wird intensiv nach Mikroorganismen gesucht, die natürlicherweise lignozellulosehaltige Biomasse besser abbauen können. Dabei wurden thermophile (hitzeliebende) Bakterien entdeckt, die kristalline Zellulose mit hohen Ausbeuten zersetzen.

Fermentationsprozesse für die Herstellung von Biokraftstoffen auf der Basis von Zuckergemischen wurden intensiv sowohl bei Hefe- als auch bei E.-coli-Zellen untersucht (Knoshaug/Zhang 2009; Lara et al. 2009; Tang et al. 2009; Westfall/Gardener 2011). Dabei zeigte sich, dass komplexe Regulationsprobleme auftauchen, die eine effiziente *Verstoffwechselung der Zuckersubstrate zu Ethanol* hemmen.

Mithilfe der Synthetischen Biologie soll nun die Fähigkeit zum Lignozelluloseabbau mit der zur effizienten Umwandlung der Zuckergemische in die gewünschten Biokraftstoffe in einem Produktionsorganismus kombiniert werden. Die Forschung richtet sich auf die Konstruktion neuer regulatorischer Stoffwechselwege aus synthetischen genetischen Elementen, die in der Lage sind, verschiedene Zuckermoleküle (Hexosen und Pentosen) effizient aus der Zellumgebung aufzunehmen und in den internen Stoffwechselweg einzuschleusen (Connor/Atsumi 2010). Es konnten Stoffwechselwege in E. coli konstruiert werden, die zu einer Ethanolausbeute von bis zu 95 % (aller Fermentationsprodukte) führten (Yomano et al. 2009).

11 www.ginkgobioworks.com (20.11.2015)

## Umwandlungseffizienz/Ausbeuterate 2.3

Bei einer gezielten Erhöhung der mikrobiellen Umwandlungsraten der Biokraftstoffproduktion besteht grundsätzlich die Gefahr, durch die Veränderung der Stoffwechselregulation die Fitness der Organismen zu beeinträchtigen. Die Herausforderung, eine bestmögliche Balance zwischen dauerhafter Robustheit der Produktionsorganismen und Ertrag zu erreichen, könnte durch Ansätze der Synthetischen Biologie bewältigt werden.

*Durchsatzoptimierung*: Stoffwechselwege sind häufig verzweigt. Um eine möglichst hohe Ausbeute des gewünschten »Kraftstoffmoleküls« zu erhalten, muss die Aktivität der beteiligten Enzyme (die Proteine, die als biochemische Katalysatoren die jeweiligen Umwandlungsschritte bewirken bzw. beschleunigen) entsprechend »eingestellt« werden. Dies kann auf ganz verschiedenen Ebenen erfolgen, u. a. durch eine Steuerung der Genaktivität mithilfe von regulatorischen RNA-Molekülen (wodurch die Menge der Enzyme beeinflusst wird; Connor/Atsumi 2010; Martínez et al. 2008; Sanchez et al. 2006) oder durch die Etablierung von nichtreversiblen Umwandlungsschritten, indem entsprechende Enzyme aus anderen Organismen gentechnisch eingebracht werden (Bond-Watts et al. 2011).

*Überwindung hemmender Rückkopplungsmechanismen*: Häufig werden Stoffwechselprozesse durch bestimmte Neben- oder Endprodukte gehemmt, z. B. die Xylosefermentation (ein spezifischer Zuckerabbauweg) durch Essigsäure (Ellis/Goodacre 2011). Die Synthetische Biologie bietet auch hier Potenziale für eine Optimierung der entsprechenden Stoffwechselprozesse. So konnten beispielsweise Organismen konstruiert werden, bei denen die Hemmung der Xylosefermentation durch Essigsäure reduziert werden konnte, indem gezielt ein Gen (Transaldolase) überexprimiert wurde, das den Stoffwechselweg tolerant gegenüber Essigsäure macht (Hasunuma et al. 2011). Neben solchen »rationalen« Designansätzen werden nach wie vor Methoden der gerichteten Evolution genutzt (Jarboe et al. 2010). Hierbei werden Mutationen induziert und durch geeignete Verfahren auf das gewünschte Ergebnis hin selektioniert.

*Produktivitätssteigerung*: Die Balance zwischen dem Wachstum von Zellkulturen und der eigentlichen Produktion der gewünschten Biokraftstoffe hat großen Einfluss auf die Umwandlungseffizienz und damit den Gesamtertrag. Ausgehend von einer einzelnen Zelle eines Produktionsorganismus können mehr als 50 Zellteilungen notwendig sein, bis die erforderliche Zelldichte für eine maximale Biokraftstoffproduktion erreicht ist (Westfall/Gardener 2011). Um diesen Prozess zu beschleunigen, wäre es hilfreich, die Organismen so beeinflussen zu können, dass in der Wachstumsphase zunächst keine oder zumindest nur eine geringe Produktion der Biokraftstoffe erfolgt und in der anschließenden Produktionsphase das Wachstum bzw. die Zellteilung reduziert wird, sodass die Produktion möglichst effizient ablaufen kann. Mithilfe der Synthetischen Biologie könnten geeignete molekulare Schalter konstruiert werden, welche in Abhängigkeit von Umweltbedingungen die internen Prozesse der Organismen dementsprechend regeln (Zhang et al. 2012). Zu den externen Faktoren, die dieses Umschalten von Wachstum auf Produktion beeinflussen können, zählen beispielsweise der Kohlenstoff- oder Stickstoffgehalt der Medien oder die Sauerstoffversorgung (Galafassi et al. 2011).

*Nutzung von Nebenprodukten*: Die optimale Nutzung möglichst aller Nebenprodukte für biologische Produktionsprozesse ist der Grundgedanke von Bioraffineriekonzepten, die im Kontext einer künftigen Bioökonomie diskutiert werden. Durch geschickte Kombination verschiedener Prozesse,

die durch unterschiedliche Organismen vollzogen werden, sollen eine optimale Verwertung und Transformation der Rohstoffe ermöglicht werden. Durch Ansätze der Synthetischen Biologie könnten Stoffwechselprozesse, die natürlicherweise in unterschiedlichen Organismen vorkommen, in einem Produktionsorganismus kombiniert werden (Young/Alper 2010). Hierdurch könnte die Steuerung der Gesamtprozesse in der Bioraffinerie vereinfacht und die Effizienz verbessert werden.

**DOWNSTREAM PROCESSING**

Für die Optimierung des »downstream processing«, d. h. die Gewinnung des gewünschten Biokraftstoffproduktes, können neben den etablierten Ingenieuransätzen auch biotechnologische Ansätze unter Nutzung von Erkenntnissen der Synthetischen Biologie genutzt werden. Diese befinden sich jedoch noch in einem relativ frühen Stadium. Ein Beispiel ist die Veränderung eines mikrobiellen Stoffwechselwegs mit dem Endprodukt Isobutanol dahingehend, dass sich schon auf einer vorhergehenden Stoffwechselstufe der entsprechende Aldehyd anreichert (Atsumi et al. 2009). Aldehyde sind wesentlich flüchtiger als Alkohole. Daher können sie viel leichter aus dem Kulturmedium gewonnen werden. Mit dieser Strategie konnte eine wesentlich bessere Produktausbeute erzielt werden, wobei der gewonnene Aldehyd später auf chemischem Weg zum gewünschten Alkohol reduziert wurde (Wackett 2011).

Ein anderer Ansatz, für den die Synthetische Biologie Potenziale bietet, besteht darin, Nebenprodukte in den Umwandlungsprozess zu den gewünschten Endprodukten einzubeziehen. So fällt z. B. bei der Biodieselherstellung Glycerin als »Abfallprodukt« an. E.-coli-Bakterien konnten gentechnisch so modifiziert werden, dass sie in der Lage sind, Glycerin in Ethanol umzuwandeln (Trinh/Srienc 2009). Mithilfe der Synthetischen Biologie könnte man nun versuchen, diese Stoffwechselfunktion in die Biodieselproduktion zu integrieren, um so insgesamt eine effizientere Herstellung von Biokraftstoffen zu erreichen.

## Alternative Biokraftstoffe aus Mikroorganismen 2.4

Ethanol ist zwar der weltweit mit Abstand meistproduzierte Biokraftstoff, hat jedoch keine optimalen Eigenschaften, z. B. nur eine geringe Energiedichte. Daher gibt es intensive Forschungsanstrengungen zur Herstellung weiterer Biokraftstoffe mit besseren Produkteigenschaften, u. a. Butanol, Isoprenoide, Fettsäuren, Biodiesel und verschiedene Alkane und Alkene.

### BUTANOL

Im Vergleich zu Ethanol weist der längerkettige Alkohol Butanol deutlich bessere Charakteristika als Kraftstoff auf (höhere Energiedichte; in reiner Form in Ottomotoren nutzbar; schlechter mit Wasser mischbar, daher weniger korrosiv und in vorhandenen Pipelines transportierbar; niedriger Dampfdruck und höherer Flammpunkt, daher sicherer handhabbar). Entsprechend ist ein steigendes Interesse an der Herstellung von Biobutanol festzustellen (Green 2011). Das bisher am besten untersuchte Butanol produzierende Bakterium ist Clostridium azetobutylicum. Schon vor über zehn Jahren wurde die Genomsequenz dieses Bakteriums publiziert (Nölling et al. 2001). Damit war die Voraussetzung für eine gentechnische Bearbeitung des Bakteriums geschaffen. In zahlreichen Arbeiten wurde versucht, die Gene für die Butanolherstellung stärker zu exprimieren und

gleichzeitig Inaktivierungsprozesse zu unterbinden. Die genetischen Regelkreise für die Butanolproduktion werden intensiv erforscht, um sie in Richtung Produktionsoptimierung zu verändern (Dürre 2011). Dabei wurden verschiedene Modelle der relevanten Stoffwechselwege auf der Basis von systembiologischen Arbeiten entwickelt (Shinto et al. 2008).

Mithilfe der Synthetischen Biologie wird außerdem versucht, verschiedene Teilstoffwechselwege aus unterschiedlichen Organismen in einem Wirtsorganismus zu einem möglichst effizienten Stoffwechselweg für die Butanolproduktion zusammenzufügen. Das Ziel ist die Verkürzung der Stoffwechselprozesse unter Vermeidung von Nebenprozessen. Ein erster Ansatz wurde erfolgreich im Bakterium E. coli umgesetzt, indem der Aminosäurestoffwechsel entsprechend modifiziert und mit dem Alkoholfermentationsstoffwechsel aus Hefe kombiniert wurde (Atsumi et al. 2008). Durch weitere gezielte Modifikation dieses Stoffwechsels wurde erreicht, dass auch sogenannte nichtnatürliche Alkohole mit 5 bis 8 Kohlenstoffatomen produziert werden konnten (Zhang et al. 2008). Diese Erfolge stellen mit die klarsten Beispiele für eine komplexe Modellierung und Etablierung von Stoffwechselwegen für die Herstellung gewünschter Produkte in Mikroorganismen als ein Kerngebiet der Synthetischen Biologie dar.

**ISOPRENOIDE**

Isoprenoide werden erst seit kürzerer Zeit als mögliche Biokraftstoffe in Betracht gezogen (Keasling/Chou 2008). Auch hier erwartet man von der Synthetischen Biologie wichtige Beiträge zur Optimierung der bisher geringen Produktionskapazitäten (Connor/Atsumi 2010). Isoprenoide sind bekannte Bestandteile des pflanzlichen Sekundärmetabolismus. Sie leiten sich von der Isopreneinheit (einem verzweigten Kohlenwasserstoff mit 5 Kohlenstoffatomen) ab. Aus Isopreneinheiten können verzweigte und zyklische Alkane, Alkene oder Alkohole synthetisiert werden, die als künftige Biokraftstoffe genutzt werden können. Für ihre Synthese werden zwei wichtige Vorstufen benötigt. Kürzlich ist es gelungen, aus einem Bakterium Gene zu identifizieren, die diese Vorstufen in das Isopentanol umwandeln (Withers et al. 2007). Die Expression der entsprechenden Gene in E. coli ermöglichte die Produktion von Isopentanol in diesem etablierten Produktionsstamm (Dellomonaco et al. 2010).

Ein anderes Beispiel für die Nutzung von Isoprenoiden als Biokraftstoffe ist die Produktion von Farnesol und Derivaten ebenfalls in E. coli, aber auch in Hefezellen, wobei verschiedene Gene aus Mikroorganismen und höheren Pflanzen zu geeigneten Stoffwechselwegen kombiniert wurden (Rude/Schirmer 2009). Diese Moleküle können als Vorstufen für Dieselkraftstoffe dienen und werden seit einigen Jahren als Kandidaten für künftige Flugzeugkraftstoffe diskutiert (Fortmann et al. 2008). Diese spielen bei Projektionen des künftigen Biokraftstoffbedarfs eine herausragende Rolle, weil anders als bei der Verwendung im Straßenverkehr oder für die Strom- und Heizenergieerzeugung im Flugverkehr bislang keine alternativen erneuerbaren Energieoptionen existieren.

Im Sommer 2014 meldete das US-amerkanische Unternehmen Amyris, Inc., dass der erste kommerzielle Flug mit einem Synbio-Treibstoff – auf Basis von Farnesol, das mit genetisch veränderter Hefe aus Zucker gewonnen wird (Renninger/McPhee 2008) – zwischen den USA und Brasilien stattgefunden hat.[12] In Brasilien steht auch die Produktionsanlage. Bei der Entwicklung arbeitet

12 www.amyris.com/first-international-commercial-flight-completed-with-newly-approved-amyris-total-aviation-biofuel/ (20.11.2015)

Amyris mit dem französischen Mineralölunternehmen Total S. A. sowie der brasilianischen Fluglinie GOL Linhas Aéras S. A. zusammen.[13] Bereits seit 2011 wird eine steigende Zahl öffentlich betriebener Busse (400 Busse bis Anfang 2014) in Sao Paulo mit Diesel auf Farnesolbasis von Amyris betrieben.[14]

## FETTSÄUREN UND ESTER (BIODIESEL)

Für die Herstellung von Fettsäuren wurden in den letzten Jahren verschiedene bakterielle und hefebasierte Produktionssysteme untersucht. Dabei werden geeignete Genkombinationen aus verschiedenen Organismen in die jeweiligen Wirtsorganismen transferiert, um die Stoffwechselwege zur Herstellung der Fettsäuren zu optimieren.

Fortschritte wurden beim Bakterium E. coli durch mehrere Strategien erzielt (Liu et al. 2010). In einem Ansatz wurden durch geeignete neue Genkombinationen die Stoffwechselprozesse und insbesondere der Kohlenstofffluss in Richtung Fettsäuren verbessert. Im Rahmen einer anderen Vorgehensweise wurden analoge Moleküle zu Fettsäuren bezüglich ihrer Eignung als Biokraftstoff und ihrer Bioproduktionsmöglichkeiten untersucht. Und bei einer dritten Strategie wurde die Synthese dieser Fettsäureanaloga von der Fettbiosynthese getrennt, um so die Anreicherung des zunächst unerwünschten Nebenprodukts Glyzerin zu vermeiden.

Für die Herstellung von Biodiesel (Fettsäuremethyl-, -ethyl- oder -propylester) mithilfe von Mikroorganismen werden zwei verschiedene Strategien verfolgt (Connor/Atsumi 2010). Im ersten Ansatz werden kurzkettige Alkohole synthetisiert, die dann im biologischen System mit zugesetzten Fettsäuren verestert werden. Der zweite Ansatz zielt darauf ab, freie Fettsäuren im biologischen Produktionssystem herzustellen, die dann extrahiert und in vitro verestert werden. Durch die Kombination einer Reihe von Genen aus unterschiedlichen Organismen konnten beide Ansätze in der Weise kombiniert werden, dass (bisher im Labormaßstab) sowohl ein kurzkettiger Alkohol (Ethanol) als auch die nötigen Fettsäuren in demselben Organismus zusammen produziert und verestert werden (Steen et al. 2010).

## ALKANE UND ALKENE

Alkane und Alkene mit Kohlenstoffketten im Bereich von 8 bis 21 Kohlenstoffatomen sind die wichtigsten Komponenten von Benzin, Diesel und Flugzeugkraftstoffen fossilen Ursprungs. Aufgrund ihrer hohen Energiedichte, ihrer Verwendbarkeit für verschiedene Transportmittel sowie ihrer vollen Kompatibilität mit der existierenden Infrastruktur für fossile Treibstoffe wäre die mikrobielle Produktion dieser Substanzen von besonderem Interesse (Peralta-Yahya et al. 2012; Rude/Schirmer 2009). Die Synthese von Alkanen und Alkenen wurde in verschiedenen Mikroorganismen einschließlich photosynthetisch aktiver Cyanobakterien nachgewiesen (Ladygina et al. 2006). Erst kürzlich konnten ein biochemischer Stoffwechselweg und dessen Gene für Alkane in Cyanobakterien aufgeklärt werden (Schirmer et al. 2010). Im Weiteren wurden Synthesewege für längerkettige

---

13 www.amyris.com/amyris-to-enter-partnership-to-supply-renewable-jet-fuel-to-gol-airlines/; www.amyris.com/amyris-and-total-announce-successful-demonstration-flight-with-renewable-jet-fuel-during-paris-air-show/ (20.11.2015)

14 http://investors.amyris.com/common/mobile/iphone/releasedetail.cfm?releaseid=814443&CompanyID=ABEA-4QL2IU&mobileid= (20.11.2015)

Alkane und kurzkettige Alkane in E.-coli-Stämmen konstruiert (Choi/Lee 2013; Schirmer et al. 2010).

Nicht nur längerkettige Alkane und Alkene werden auf ihre Eignung für die Bioproduktion von Energieträgern analysiert, sondern auch kürzerkettige Alkene wie beispielsweise Isobuten (Leeuwen et al. 2012). Dieses Molekül wird überwiegend als Baustein in der chemischen Industrie für die Kunststoffproduktion genutzt (Kap. III.1). Es kann jedoch auch in Energieträger umgewandelt werden. Der große Vorteil dieser kürzerkettigen Substanzen ist, dass sie bei einer Bioproduktion in gasförmigen Zustand anfallen. Dies erleichtert einerseits die Rückgewinnung und Aufarbeitung der Produkte. Andererseits wird verhindert, dass sich Endprodukte in den Organismen anreichern und die Stoffwechselwege blockieren. Aktuelle Forschungsarbeiten zur Optimierung der Herstellung von kürzerkettigen Alkanen und Alkenen umfassen die Verbesserung der Enzymaktivität durch verschiedene Mutationsstrategien, die Stammentwicklung, die Optimierung der Fermentationsprozesse durch Variation der Prozessparameter, die Nutzung von gerichteten Evolutionsstrategien für die Prozessoptimierung sowie die gezielte Einführung von Mutationen auf der Basis von In-silico-Modellen und dreidimensionalen Strukturanalysen der Schlüsselenzyme der Stoffwechselwege (Experteneinschätzungen aus Interviews, die Reiß und van Doren im Rahmen dieses TA-Projekts 2012 durchgeführt haben).

## Zum ökonomischen Potenzial von Anwendungen im Energiesektor 2.5

Die meisten beschriebenen Ansätze sind von einer breiten Nutzung noch weit entfernt. Wie das Beispiel von farnesolbasiertem Diesel und Flugtreibstoff von Amyris zeigt, sind mittlerweile aber einige Produkte in der präkommerziellen Entwicklung so weit fortgeschritten, dass Praxistests durchgeführt werden. Dasselbe gilt auch für Biodiesel, Diesel und Flugtreibstoff, die über die Fermentierung von Zucker mit genetisch veränderten Algen (Trimbur et al. 2010) von Solazyme hergestellt werden. Hier fand darüberhinaus eine erste erfolgreiche kommerzielle Pilotstudie mit Biodiesel statt.[15]

Eine ernsthafte Prognose zur mittel- und längerfristigen Konkurrenzfähigkeit und damit zum (soziooökonomischen) Problemlösungspotenzial ist dennoch nicht möglich. Hier spielen nicht nur Unvorhersehbarkeiten bezüglich Entwicklungen bei den beschriebenen Synbio-Ansätzen eine Rolle, sondern insbesondere auch technische Entwicklungen in anderen Bereichen (Stichworte: Fracking in den USA; Gewinnung und Speicherung von regenerativ erzeugter elektrischer Energie; nicht biologisch erzeugte »Solarfuels«) sowie ökonomische und politische Entwicklungen (Änderungen im globalen Wirtschaftswachstum/Nachfrage oder geopolitische Krisen), die in starkem Maße das Angebot und den Preis von (anderen) regenerativen und von fossilen Energieträgern bestimmen können. Der starke Sturz des Ölpreises nach der Finanzkrise von 2007/2008 könnte trotz der Preiserholung zwischen 2009 und 2014[16] ein Faktor gewesen sein, der die Erwartungen in die ökonomische Konkurrenzfähigkeit neuer Generationen von Biokraftstoffen negativ beeinflusst zu hat: Unter anderem haben Mineralölkonzerne wie BP p.l.c. und Royal Dutch Shell plc. jahrelange massive Investitionen vor allem in die Zelluloseethanolproduktion reduziert, und BP hat seine Aktivitäten im

15 http://propelfuels.com/news_and_media/press_releases/soladiesel_algae_based_fuel_drives_successful_consumer_trial_at_propel_fuel (20.11.2015)

16 www.nasdaq.com/markets/crude-oil.aspx?timeframe=8y (20.11.2015)

Dezember 2014 ganz beendet (Economist 2013; Kaltwasser 2015). Auch Projekte von Exxon Mobil Corporation oder das von Bill Gates und der US-Regierung unterstützte Synbio-Algenölprojekt der US-amerikanischen Firma Sapphire Energy, Inc., wurden in den letzten Jahren stark zurückgefahren (Ferry 2015). Der seit Mitte 2014 erneut stark gefallene Ölpreis könnte solche Entwicklungen beschleunigt haben und weiter beschleunigen. Dass die Synbio vermutlich noch für längere Zeit ökonomisch kaum als Konkurrenztechnologie für die nur über sehr große Mengen profitable Produktion von Bulkchemikalien oder Kraftstoffen wird dienen können, hat auch Craig Venter Anfang 2014 in einem Interview betont (Venter 2014). Insgesamt sind sich die meisten Beobachter einig, dass die Perspektive der Synbio-Anwendungen in den kommenden Jahren bei kleinvolumigen, aber hochpreisigen Produkten liegen wird, d. h. bei Spezialchemikalien, Pharmaka und anderen Anwendungen im Gesundheitsbereich (Kap. III.3).

Hinzu kommen Aspekte der ökologischen Bewertung, welche die Vorzüglichkeit und Wettbewerbsfähigkeit der neuen Produktionssysteme fundamental beeinflussen. So stellt sich bei der Biokraftstoffproduktion mit gentechnisch optimierten Mikroalgen insbesondere die Frage, ob die entsprechenden Organismen in großem Maßstab in (halb)offenen Wasserbecken kultiviert werden können oder in wie weit geschlossene Systeme (kombiniert mit kontinuierlichen Produktionsprozessen (Reppas/Ridley 2010; Robertson et al. 2011) genutzt werden müssten (Kap. IV.1). Außerdem ist die Mikroalgenproduktion ein sehr wasser- und nährstoffintensiver Prozess, sodass unklar ist, ob bzw. mit welchen dieser Ansätze sich eine ökonomisch rentable und nachhaltige Produktion von Biokraftstoffen realisieren lässt (TAB 2012b). Dabei muss u. a. berücksichtigt werden, dass der Wasserbedarf in Biokraftstoffproduktionssystemen bisher keinen formalen Indikator im Rahmen der europäischen Nachhaltigkeitskriterien für die Bioenergieproduktion darstellt (Radakovits et al. 2010; Westfall/Gardener 2011).

Angesichts der drängenden Herausforderungen bei der Suche nach Optionen einer unabhängigeren und nachhaltigeren Energieversorgung wird aber auch zukünftig eine breite Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sinnvoll sein (Kap. VII.2.1), ohne von einzelnen Innovationen und Technologielinien zu viel zu erwarten und ohne in frühen Stadien eine spätere Konkurrenzfähigkeit ernsthaft abschätzen zu können.

## Medizin 3.

Medizin, Arzneimittelforschung und Gesundheitsversorgung stehen vor großen Herausforderungen: Neue Wirkstoffe bzw. Wirkmechanismen gegen sich ändernde Krankheitserreger müssen entwickelt, der zunehmende Bedarf an Medikamenten und Therapien angesichts einer wachsenden Weltbevölkerung gedeckt und Behandlungsmethoden sowohl für seltene als auch für die weitverbreiteten, multifaktoriellen und häufig chronischen Erkrankungen, wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Krebs oder Diabetes, gesucht werden. Letztere sind die Haupttodesursachen in den industrialisierten Ländern; ihre Bedeutung wächst aber insbesondere auch in Schwellenländern (Bygbjerg 2012; Daar et al. 2007). In Entwicklungsländern gelten sowohl die Bekämpfung von Infektionskrankheiten als auch die Impfstoffentwicklung nach wie vor als die Hauptherausforderungen.[17] Die synthetische Biologie stellt eine Reihe von Ansätzen für neue therapeutische Behandlungsstrategien

17 http://gcgh.grandchallenges.org/about (20.11.2015)

sowie für neuartige Entwicklungs- und Produktionsverfahren für Pharmazeutika und Impfstoffe bereit (Übersichten u. a. bei König et al. 2013; Ruder et al. 2011; Weber/Fussenegger 2012). Auch in der Diagnostik gibt es erste Beispiele für Anwendungsmöglichkeiten, wie einen Biosensor zum Ebolaerregernachweis, für den ein zellfreies System mit einem genetischen Schaltkreis entwickelt wurde, das auf einen Papierträger aufgebracht wurde und das auch unter widrigen Praxisbedingungen funktionieren soll (Green et al. 2014; Henn 2014; Pardee et al. 2014).

Während sich die meisten dieser Ansätze noch in frühen, präklinischen Forschungsphasen befinden, haben einige Verfahren das Stadium der klinischen Prüfung bzw. von großflächigen Freilandexperimenten oder der kommerziellen Produktion erreicht. Hierzu gehören modifizierte Viren zur Krebsbekämpfung
(Patel/Kratzke 2013), genetisch veränderte Stechmücken zur Kontrolle von Denguefieber (Harris et al. 2012; Lacroix et al. 2012) sowie die Produktion des Pflanzenstoffes Artemisinin als wichtiger Bestandteil von Malariamedikamenten, basierend auf Mikroorganismen mit neukonstruierten Stoffwechselwegen (Paddon et al. 2013; Peplow 2013).

## Entwicklung von Therapeutika und Impfstoffen 3.1

Die Entwicklung neuer pharmazeutischer Wirkstoffe und die schnellere Herstellung effizienter Impfstoffe sind zentrale Aufgaben einer wirksamen zukünftigen Gesundheitsversorgung. Besondere Probleme entstehen durch die Zunahme von Bakterienstämmen, die gegen viele der existierenden Antibiotika resistent sind (Cars et al. 2011). Aber auch sich ständig verändernde Viren, wie z. B. Influenzaviren, und die davon ausgehende Gefahr einer länder- und kontinentübergreifenden Ausbreitung entsprechender Krankheiten (Pandemien) bilden eine kontinuierliche, fundamentale Herausforderung (Guan et al. 2010; Rappuoli/Dormitzer 2012).

Erste, auf Bakterien oder auf Zellkulturen basierende Systeme zur Suche nach neuen Wirkstoffen (»drug screening«) wurden durch »synthetische« genetische Schaltkreise geschaffen, die auf der Kombination verschiedener genetischer Kontrollelemente und Teilen von Proteinen mit unterschiedlichen Funktionen beruhen. Solche synthetischen Schaltkreise bilden (Teil-)Prozesse von Krankheitsmechanismen auf molekularer Ebene nach und erlauben es, über die Kopplung an sogenannte Reportergensysteme Wirkstoffe, die diese Prozesse beeinflussen, schnell zu identifizieren. Auf diese Weise wurden beispielsweise Testsysteme hergestellt, um Wirkstoffkandidaten zur Behandlung von HIV-Infektionen zu identifizieren (Tavassoli et al. 2008) oder um Antibiotikaresistenzen bei Tuberkulose zu verstehen und zu überwinden (Weber et al. 2008).[18]

Die Herstellung effizienterer Impfstoffe und deren schnellere Verfügbarkeit (Rappuoli/Dormitzer 2012), aber auch ein besseres Verständnis der Entwicklung und der Eigenschaften von Krankheitserregern (z. B. von Grippe-, SARS- oder HI-Viren) (Wimmer et al. 2009), ist durch die Fortschritte der letzten Jahre in der Bioinformatik, bei der DNA-Sequenzierung und -Synthese sowie bei Techniken zum Zusammensetzen großer Genomteile oder kompletter Genome von Viren (und zunehmend von Bakterien) stark befördert worden.

18 www.bioversys.com/ (20.11.2015)

Bei der Impfstoffentwicklung wird die computergestützte, bioinformatische Identifizierung von Proteinen als Impfstoffkandidaten aus Genomsequenzen von Krankheitserregern (»reverse vaccinology«) bereits heute routinemäßig genutzt. Durch die Kombination von synthetisierten und expressionsoptimierten Gensequenzen für solche Proteine können einfach und schnell effiziente, sogenannte chimäre Impfstoffe hergestellt werden (Kindsmüller/Wagner 2011). Neue Methoden zur schnellen und gleichzeitig fehlerfreien Synthese von kritischen, sich verändernden viralen Genen und deren Einbau in Standardviren (»Seedviren«) (Dormitzer et al. 2013),[19] wie sie zur Entwicklung von Impfstoffen (z. B. für Influenzainfektionen) verwendet werden, könnten zu einer schnelleren Impfstoffentwicklung beitragen (Kupferschmidt 2013; Rappuoli/Dormitzer 2012). Fortschritte bei der Gensynthese und dem Design von Genen könnten darüber hinaus auch neue, effektivere Impfstoffe ermöglichen: So wurden Verfahren entwickelt, bei denen gleichzeitig Hunderte von Buchstaben des genetischen Codes (Nukleotide) über chemisch synthetisierte Teile von Virengenomen und mittels computergestützter Designmethoden verändert werden können, ohne dabei die Proteinsequenzen zu verändern (sogenannte Codon- oder Codon-Paar-Deoptimierung) (Coleman et al. 2008). Hierdurch können in ihrer Virulenz stark abgeschwächte Viren als Lebendimpfstoffe entwickelt und hergestellt werden, die durch ihre mit dem »Originalvirus« exakt übereinstimmende Protein- bzw. Antigensequenzen gleichzeitig eine gute Impfreaktion gewährleisten (Coleman et al. 2008; Wimmer et al. 2009).[20] Dabei reduziert die sehr hohe Zahl von Veränderungen im Erbgut eine Wahrscheinlichkeit für eine zufällige Rückmutation auf ein Minimum, was einen wichtigen Sicherheitsgewinn darstellt. Im Mausmodell konnten auf diese Weise sichere und effektive Influenzaimpfstoffe entwickelt werden (Mueller et al. 2010). Die Synthese von Virengenomen oder Teilen davon könnte ein wichtiges Instrument werden, um Pandemien viraler Krankheiten (wie z. B. Influenza) durch die schnelle Verfügbarkeit passender Impfstoffe zukünftig effektiver zu bekämpfen oder zu verhindern.

Die Genomsynthese von Viren ist jedoch gleichzeitig – insbesondere in Zusammenhang mit Experimenten zu Erbgutveränderungen bei H5N1-Vogelgrippeviren und Vorschlägen für ähnliche Experimente mit H7N9-Vogelgrippeviren, welche die Übertragbarkeit solcher Viren zwischen Menschen steigern könnten (Kap. IV.2.1) – zentraler Kristallisationspunkt der Diskussion über mögliche Gefahren (Bioerror) bis hin zum potenziellen Missbrauch (Bioterror) der Synthetischen Biologie geworden (Kap. IV.2).

## Gen- und zellbasierte Therapien 3.2

Der Begriff der Gentherapie wurde ursprünglich vor allem im Zusammenhang mit der möglichen Behandlung von Krankheiten verwendet, die durch einen Defekt in einem einzelnen Gen hervorgerufen werden (sogenannte monogene Erkrankungen). Hierzu gehören z. B. bestimmte Formen angeborener Immunschwächeerkrankungen, die Bluterkrankheit (Hämophilie) oder Mukoviszidose. Bei einer »klassischen« Gentherapie soll die Funktion des mutierten krankheitsauslösenden Gens durch Einbringen einer funktionellen Genkopie ersetzt werden (Verma/Somia 1997). Diese Verfahren, bei denen typischerweise lediglich ein einzelnes Gen – bzw. ein in DNA umgeschriebenes Boten-RNA-Molekül dieses Gens – über virale Trägervehikel (sogenannte Vektoren) in Körperzellen

19 www.syntheticgenomics.com/sgvi.html (20.11.2015)
20 www.codagenix.com (20.11.2015)

eingebracht wird, beruhen weitgehend auf traditionellen Gentechnikansätzen (Verma/Weitzman 2005) und sollen deshalb hier nicht weiter behandelt werden.

## GENOME ENGINEERING

Näher an zentralen Konzepten der Synthetischen Biologie – nämlich der Herstellung neuer biologischer Systeme und Funktionen durch die Kombination existierender oder neu entworfener »biologischer Teile« – sind Ansätze zur Reparatur oder für den Austausch defekter Gene sowie zur Inaktivierung »krankmachender« Gene (z. B. Gene, die den Eintritt bestimmter Viren in Zellen vermitteln). Hierzu werden Chimären, d. h. kombinierte Moleküle, aus bestimmten DNA-bindenden und DNA-schneidenden Proteinen (Zinkfingernukleasen [ZFN], »transcription activator-like effector nuclease« [TALEN]) genutzt, deren DNA-Bindefunktion so programmiert wurde, dass sie das defekte Gen im Erbgut spezifisch ansteuern und bearbeiten können (Carlson et al. 2012; Doudna/Charpentier 2014; Niu et al. 2014; Urnov et al. 2010). Darüber hinaus wurde ein RNA-geleitetes DNA-Schneidesystem (CRISPR/Cas) aus Bakterien so verändert, dass es für ein solches »Genome Editing« einfach und in vielfältiger Weise nutzbar gemacht werden kann (Mussolino/Cathomen 2013). Diese Ansätze zur gezielten Veränderung von Genen im Erbgut wurden sowohl in Tiermodellen als auch in menschlichen Zellkulturen (Carlson et al. 2012; Li et al. 2011; Mussolino/Cathomen 2013; Osborn et al. 2013) und mittlerweile in ersten klinischen Versuchen getestet (Maier et al. 2013; Urnov et al. 2010).

## GENBASIERTE THERAPIEN

Der Begriff der Gentherapie wird mittlerweile deutlich weiter als ursprünglich gefasst und bezieht alle Verfahren ein, bei denen genetisches Material in Zellen oder Gewebe eingebracht wird, um Krankheiten zu bekämpfen oder zu verhindern.[21] Die eingebrachten Gene müssen dabei nicht notwendigerweise die krankheitsauslösenden Ursachen korrigieren (die häufig multiple genetische Veränderungen, beispielsweise in Tumoren, umfassen), sondern können u. a. dazu dienen, kranke Zellen abzutöten oder für das körperliche Abwehrsystem zugänglich zu machen (Kay 2011; Verma/Weitzman 2005). Hierzu gehören Verfahren unter Verwendung von Viren, die einzelne Gene mit entsprechenden Funktionen enthalten oder sich – als Folge gezielter Veränderungen in ihren Genen – spezifisch in Tumorzellen vermehren und diese dabei zerstören (Kay 2011). Beispiele für solche Viren werden in Kapitel III.3.3 vorgestellt.

Unter einem erweiterten Begriff von Gentherapie (genauer: genbasierte Therapie) lassen sich Ansätze der Synthetischen Biologie einordnen, bei denen komplexe genetische Schaltkreise entworfen werden und als Grundlage für neue therapeutische Verfahren für Krebs- und Stoffwechselerkrankungen genutzt werden sollen. Solche Schaltkreise umfassen sensorische und genregulatorische Proteine (die teilweise selbst aus Teilen unterschiedlicher Proteine hergestellt wurden), DNA-Steuerelemente für Gene oder regulatorische RNA-Komponenten (wie microRNAs oder sogenannte

21 »Gene therapy is an experimental treatment that involves introducing genetic material into a person's cells to fight or prevent disease.« (Genetics Home Reference, National Institutes of Health; www.genetherapynet.com/what-is-gene-therapy.html) »Die Gentherapie ist definiert als das Einbringen von Genen mittels Gentransfer in Gewebe oder Zellen mit dem Ziel, durch die Funktion dieser Gene therapeutischen oder präventiven Nutzen zu erlangen.« (DFG 2012)

synthetische Riboschalterelemente) für die Kontrolle der Herstellung von Proteinen in Zellen (Ausländer/Fussenegger 2013). Für die Bekämpfung von Krebszellen wurden beispielsweise »synthetische«, genetisch kodierte Regelnetzwerke beschrieben, die verschiedene molekulare Veränderungen in Krebszellen erkennen können und daraufhin Reaktionen auslösen, durch die krebsartig veränderte Zellen zerstört werden (Culler et al. 2010; Xie et al. 2011). Für therapeutische Zwecke müssten diese bisher in Zellkulturen getesteten genetischen Schaltkreise in Zellen des menschlichen Körpers eingeführt werden. Wie bei »traditionellen« gentherapeutischen Verfahren könnten dazu Viren als Vehikel verwendet werden.

#### GEN- UND ZELLBASIERTE SYSTEME

»Synthetische« Genschaltkreise, die Veränderungen in Zellen oder im Organismus erkennen und daraufhin »therapeutische« Reaktionen bewirken können, bilden auch die Grundlage für sogenannte zelluläre »Prothesensysteme« (»prosthetic devices«) zur Behandlung von Stoffwechselstörungen. Die genetischen Schaltkreise wurden hierzu in etablierte Säugetierzelllinien eingebracht, die dann in biologisch kompatiblen Mikrokapseln eingeschlossen in den Organismus transplantiert werden können. Ein solches selbstregulierendes System zur Kontrolle der Harnsäurekonzentration im Körper wurde erfolgreich in einem Krankheitsmodell für Gicht in Mäusen getestet (Kemmer et al. 2010). Ähnliche, von außen durch Licht oder Wirkstoffe steuerbare Systeme wurden zur Behandlung von Diabetes und des metabolischen Syndroms – einer Kombination aus Bluthochdruck, erhöhtem Blutzucker, Störung der Blutfettwerte und Fettleibigkeit – hergestellt und ebenfalls erfolgreich in Mausmodellen getestet (Ye et al. 2011 u. 2013).

## Veränderte Viren, Bakterien und Insekten zur Krankheitsbekämpfung 3.3

#### VIREN

Viren, die zur Abtötung von Krebszellen in der Lage sein sollen, sind bereits relativ früh entwickelt worden. Diese Ansätze beruhen auf einer Kombination von traditioneller Gentechnik (d. h. dem Entfernen, der Modifikation oder dem Einbringen von ein bis zwei natürlich vorkommenden Genen) und dem Konzept der synthetischen Biologie, durch die Kombination vorhandener »biologischer Teile« neue Funktionen, wie z. B. eine tumorspezifische Virusvermehrung, zu erzeugen (Cattaneo et al. 2008; Dorer/Nettelbeck 2009). Entsprechend hergestellte Herpes- (Liu et al. 2003) oder Pockenviren (Kirn/Thorne 2009) wurden bereits in klinischen Versuchen am Menschen getestet (Breitbach et al. 2011; Hu et al. 2006; Patel/Kratzke 2013).

Mit denselben methodischen Ansätzen wurden bakterienspezifische Viren (sogenannte Bakteriophagen) verändert, um bakterielle Biofilme (Beläge mit Bakterien, in denen diese vor dem Zugriff des menschlichen Abwehrsystems geschützt sein können) gezielt aufzulösen (Lu/Collins 2007). Des Weiteren konnten Bakteriophagen genetisch so verändert werden, dass sie die Wirkung von Antibiotika verstärken und Antibiotikaresistenzen reduzieren konnten. Dieser Ansatz wurde erfolgreich in Tierexperimenten mit Mäusen getestet (Lu/Collins 2009). Ansätze zur Entwicklung und Kommerzialisierung ähnlicher Bakteriophagen, mit synthetisch hergestellten Genomen, zur Bekämpfung von Bakterieninfektionen werden derzeit vom US-amerikanischen Unternehmen Synthetic

Genomics, Inc., verfolgt.[22] Durch Verwendung des einfach zu programmierenden CRISPR/Cas-DNA-Schneidesystems (Kap. III.3.2), das eingesetzt werden kann, um ganz spezifisch bestimmte Bakterien abzutöten (Gomaa et al. 2014), könnten Phagen konstruiert werden, die an sich entwickelnde Resistenzmechanismen von Bakterien schnell angepasst werden könnten. Neben den medizinischen Anwendungen könnten solche Phagen auch zur Bekämpfung von bakteriellen Pflanzenkrankheiten in der Landwirtschaft eingesetzt werden.

**BAKTERIEN**

Mit dem Ziel der Bekämpfung von Tumoren und deren Tochtergeschwülsten (Metastasen) werden Bakterien als Grundlage für die Entwicklung entsprechender »lebender Therapeutika« genetisch verändert. Dabei wurden Bakterienstämme wie z. B. Salmonella typhimurium, die natürlicherweise in Tumoren akkumulieren und sich dort vermehren können (Morrissey et al. 2010), mit der Fähigkeit versehen, Vorläufer zytotoxischer Substanzen in aktive Zellgifte umzuwandeln (Royo et al. 2007) oder direkt ein zytotoxisches Protein zu produzieren (Nguyen et al. 2010). Dies wurde durch den Transfer von einem bzw. einigen wenigen Genen oder aber von zusammengesetzten Genkonstrukten erreicht. Derart veränderte Bakterien sind in Tiermodellen und ersten klinischen Versuchen am Menschen getestet worden (Forbes 2010; Morrissey et al. 2010). In komplexeren Ansätzen sollen Bakterienstämme, die natürlicherweise nicht in Tumoren akkumulieren, gezielt mit mehreren gewünschten Funktionen ausgestattet werden, teilweise beruhend auf der Konstruktion komplizierter genetischer Schaltkreise. So wurden E.-coli-Bakterien durch das Einbringen entsprechender Gene aus anderen Bakterien und von synthetischen Genkonstrukten mit komplexen Fähigkeiten – z. B. zur Detektion der in vielen Tumoren herrschenden Sauerstoffarmut, gekoppelt an die Invasion entsprechender Zellen – versehen (Anderson et al. 2006). Bei einem anderen Ansatz wurde die Fähigkeit zur Zellinvasion hervorgerufen und mit der Produktion und Weitergabe bestimmter Moleküle (nichtkodierende RNAs) verknüpft, die eine Hemmung von Tumorwachstumsfaktoren bewirken (sogenannte RNA-Interferenz) (Xiang et al. 2006). Entsprechend veränderte E.-coli-Bakterien wurden bisher in Zellkulturexperimenten und teilweise an Mäusen getestet.

Außer zur Tumortherapie gibt es Ansätze, nichtpathogene Bakterienstämme des menschlichen Mikrobioms – also nichtpathogene Mikroorganismen, die regelmäßig, quasisymbiotisch im oder auf dem menschlichen Körper vorkommen (und dort z. T. gesundheitsförderliche Wirkungen hervorrufen, wie z. B. probiotische Darmbakterien) – mit Eigenschaften zu versehen, die sie zur Bekämpfung von Infektionen durch andere Bakterien nutzbar machen sollen. Hierzu werden Teile der für verschiedene Bakterienarten spezifischen Kommunikationssysteme (»quorum sensing«) und deren Botenstoffe genutzt: Über synthetische Genkonstrukte werden diese in genetischen Schaltkreisen so kombiniert, dass sie die Anwesenheit pathogener Bakterien erkennen und daraufhin Stoffe produzieren, die auf die Krankheitserreger toxisch bzw. hemmend wirken. Auf diese Weise wurden E.-coli-Bakterien hergestellt, die Pseudomonas aeruginosa – ein Bakterium, das vor allem in immungeschwächten Patienten lebensbedrohliche Infektionen der Atemwege und des Verdauungstrakts auslösen kann – in Laborexperimenten detektieren, verfolgen und töten können (Hwang et al. 2013;

22 www.syntheticgenomics.com/sgvi.html#antimicrobial; www.economist.com/news/science-and-technology/21645122-way-treat-bacterial-infections-artificial-viruses-strange-medicine (20.11.2015)

Saeidi et al. 2011). In einem weiteren solchen Ansatz wurde ein probiotisches Darmbakterium generiert, das in einem Mausmodell die Pathogenität des Choleraerregers reduzieren konnte und die Überlebensrate der Mäuse nach einer Cholerainfektion stark erhöhte (Duan/March 2010).

## KRANKHEITSÜBERTRAGENDE STECHMÜCKEN

Relativ einfache genetische Regelkreise aus »synthetisch gekoppelten« Elementen sind die Grundlage einer genetischen Veränderung bestimmter krankheitsübertragender Stechmücken mit dem Ziel, deren natürliche Populationen effektiv bekämpfen zu können. Objekte entsprechender Ansätze sind derzeit vor allem Stechmückenarten in tropischen und subtropischen Gebieten der Erde, die Malaria und Denguefieber übertragen. Die Reduktion oder Eliminierung von Mückenpopulationen folgt dabei dem Prinzip der sogenannten »sterilen Insektentechnik« (SIT) (Wimmer 2005). Dabei werden chemisch oder durch radioaktive Strahlung sterilisierte männliche Tiere in sehr großer Zahl freigesetzt. Hierdurch werden Weibchen (die sich i. d. R. nur einmal paaren) bevorzugt durch die freigesetzten sterilen Männchen begattet. Aus diesen Paarungen entstehen keine überlebensfähigen Nachkommen; die Population von Stechmücken an einem bestimmten Ort kann so durch wiederholte Freisetzungen stark reduziert oder eliminiert werden. Herausforderungen sind dabei der Erhalt der Vitalität der bestrahlten oder chemisch behandelten männlichen Tiere sowie die aufwendigen Verfahren, um große Mengen rein männlicher Tiere zu erhalten, die für die Methode erforderlich sind. Letzteres erfordert das aufwendige Aussortieren weiblicher Tiere, die Blut saugen und so zur Krankheitsverbreitung beitragen würden (Black et al. 2011; Wimmer 2005).

Diese Schwierigkeiten sollen durch Ansätze überwunden werden, die Ideen der Synthetischen Biologie aufgreifen. Dabei werden die Tiere nicht mit Chemikalien oder Strahlung sterilisiert, sondern durch das Einbringen regulierbarer Genschaltkreise so verändert, dass sie keine überlebensfähigen Nachkommen erzeugen können. So wurde ein einfacher und durch das Antibiotikum Tetrazyklin hemmbarer genetischer Regelkreis zur Produktion eines synthetischen Genaktivatorproteins in das Erbgut der Gelbfiebermücke (Stegomyia aegypti bzw. Aedes aegypti) – der Überträgerin von Denguefieber auslösenden Viren – eingebracht. In Abwesenheit von Tetrazyklin erzeugt dieser Regelkreis in sich selbst verstärkender Weise große Mengen des Genaktivators, der toxisch wirkt. Wird dieser genetische Regelkreis an wilde Stechmücken weitergegeben, führt er im Freiland (ohne Tetrazyklin) zum Absterben der Nachkommen, während die Nachzucht der veränderten Tiere im Labor durch Tetrazyklingaben problemlos möglich ist (Phuc et al. 2007). Entsprechend gentechnisch veränderte Stechmücken wurden von der britischen Firma Oxitec Ltd. in Freilandversuchen auf den Kaimaninseln eingesetzt und konnten wilde Stechmückenpopulationen in Testgebieten reduzieren (Harris et al. 2011 u. 2012). Weitere Freilandversuche wurden von Oxitec in Malaysia, Panama und Brasilien durchgeführt (Lacroix et al. 2012; Oxitec 2011; Reeves et al. 2012), die in verschiedener Hinsicht massiv kritisiert worden sind (Kap. III.3.5). Brasilien erteilte im April 2014 eine Zulassung, woraufhin Oxitec im Sommer 2014 eine Produktionsstätte eröffnete.[23]

Darüber hinaus wurden regulierbare genetische Systeme in Gelbfiebermücken entwickelt, die nur für weibliche Nachkommen letal sind (Black et al. 2011). Diese etwas komplexeren genetischen Systeme sind so konstruiert, dass sie spezifisch bei Weibchen die für die Nahrungsaufnahme und Fortpflanzung notwendige Flugfähigkeit verhindern (Fu et al. 2007 u. 2010; Heinrich/Scott 2000;

23 www.oxitec.com/press-release-oxitec-do-brasil-opens-its-first-mosquito-production-unit-to-fight-the-dengue-vector-aedes-aegypti/ (20.11.2015)

Wise de Valdez et al. 2011). Ein solches System, das auch genutzt wurde, um ohne aufwendige Sortierprozesse sehr große Zahlen an rein männlichen Stechmücken zu erhalten (Wise de Valdez et al. 2011), wurde bereits in Käfigexperimenten außerhalb des Labors (d. h. unter freilandähnlichen Bedingungen) getestet, allerdings bisher mit wenig Wirkung auf die untersuchten Wildpopulationen (Facchinelli et al. 2013).

Eine andere Strategie zur Bekämpfung von Krankheiten, die durch Stechmücken übertragen werden, beruht auf sogenannten mobilen, parasitären genetischen Elementen. Zu diesen Elementen gehören Homing-Endonuclease-Gene, die natürlicherweise in vielen einzelligen Mikroorganismen vorkommen (Burt/Koufopanou 2004). Wird ein solches genetisches Element in ein Chromosom integriert (z. B. bei der Befruchtung), so wird auf dem entsprechenden (homologen) zweiten Chromosom – das zunächst kein solches Element enthält – an der entsprechenden Stelle eine Kopie erzeugt (sogenanntes »homing«). Hierdurch werden die Elemente in nachfolgenden Fortpflanzungszyklen immer (über alle produzierten Keimzellen) weitergegeben und können sich sehr schnell in Populationen ausbreiten (sogenanntes »gene drive«). Experimente in Käfigpopulationen von Malariastechmücken (Anopheles gambiae) sowie Modellrechnungen legen nahe, dass mit dieser Strategie gentechnisch erzeugte Funktionen, z. B. eine Resistenz der Stechmücken gegen den Malariaerreger oder eine Inaktivierung von Fertilitätsgenen, in wilden Stechmückenpopulationen schnell verbreitet werden könnten (Deredec et al. 2011; Windbichler et al. 2011). Die möglichen ökologischen Konsequenzen sowie Fragen der Regulierung von Gene-Drive-Anwendungen (Esvelt et al. 2014; Oye et al. 2014) dürften ein hochkontroverses Thema der kommenden Jahre werden (Kap. IV.1.5).

## Biosynthese von Pharmaka/Arzneimitteln 3.4

Die Produktion von Pflanzenstoffen in Mikroorganismen ist, vor allem mit Blick auf das Malariamedikament Artemisinin, eine der bekanntesten und meist diskutierten Anwendungen der Synthetischen Biologie (EGE 2009; ETC Group 2007; Heemskerk et al. 2006; PCSBI 2010a). Dabei werden komplexe Stoffwechselwege in Mikroorganismen unter Verwendung von Genen aus unterschiedlichen Organismen generiert. Neben der Herstellung eines Vorläufermoleküls für Artemisinin in Bäckerhefe (Saccharomyces cerevisiae) (Paddon et al. 2013; Ro et al. 2006) wurde der Stoffwechselweg für einen weiteren wichtigen Pflanzenstoff, Paclitaxel (Taxol), in E. coli (Ajikumar et al. 2010) etabliert und optimiert.

Artemisinin, ein Inhaltsstoff des Einjährigen Beifußes (Artemisia annua), ist eine wichtige Komponente in der Kombinationstherapie für multiresistente Formen von Malaria (Heemskerk et al. 2006; Kar/Kar 2010). Paclitaxel (bekannt unter dem Arzneimittelnamen Taxol) stellt eines der wichtigsten Krebsmedikamente bei Chemotherapien dar und wurde zunächst aus der Rinde der Pazifischen Eibe (Taxus brevifolia) isoliert. Industriell wird es heute vor allem über die chemische Modifikation einer Vorstufe gewonnen, die in den Nadeln der weiter verbreiteten Europäischen Eibe (Taxus baccata) vorkommt, sowie aus Eibenzellkulturen (Liu/Khosla 2010 und Referenzen darin).

In beiden Fällen wurden Synthesewege aus einem »oberen« Wegabschnitt, bestehend aus Enzymen der Ausgangsorganismen (Hefe bzw. E. coli), und einem »unteren« Teil mit den pflanzlichen Enzymen konstruiert. Der Stofffluss durch diese kombinierten Stoffwechselwege wurde dann durch Veränderungen an mehreren der Gene zur Optimierung der entsprechenden Enzymmengen gesteigert (Ajikumar et al. 2010; Paddon et al. 2013; Ro et al. 2006). Beide Ansätze stehen somit zwischen

der neuartigen Zielsetzung der synthetischen Biologie einer Schaffung komplett neuer Synthesewege und einem eher traditionellen Metabolic Engineering, das lediglich den Stofffluss in einem natürlichen Produktionsstamm hin zu dem gewünschten Produkt verbessert (Nielsen/Keasling 2011).

Grundsätzlich können solche mikrobiellen Herstellungswege günstigere Alternativen darstellen, wenn bisherige Produktionsverfahren für pharmazeutisch aktive Pflanzenstoffe auf begrenzt verfügbarem Pflanzenmaterial oder aufwendigen und teuren Zellkulturen basieren, wie im Falle von Taxol (Liu/Khosla 2010), oder aber eine ausreichende Produktion aus Pflanzenmaterial nicht kontinuierlich gewährleistet war, wie im Fall von Artemisinin (Peplow 2013; Noorden 2010). Artemisinin wird mittlerweile vom französischen Pharmakonzern Sanofi S. A. in industriellem Maßstab hergestellt (PATH 2013; Peplow 2013).

## Zum ökonomischen Potenzial von Anwendungen im Gesundheitsbereich 3.5

Bei der Betrachtung möglicher ökonomischer Potenziale von neuen Therapeutika müssen neben den Möglichkeiten für wirtschaftliches Wachstum im Gesundheitsbereich und der pharmazeutischen Industrie vor allem grundlegende positive makroökonomische Effekte auf Volkswirtschaften in Betracht gezogen werden. Insbesondere Infektionskrankheiten wie HIV/Aids oder Malaria behindern die gesamte Wirtschaftsentwicklung in Entwicklungsländern. Aber auch nichtübertragbare und chronische Krankheiten belasten Volkswirtschaften in großem Maße, sowohl in Industrie- als auch in Entwicklungsländern (Bygbjerg 2012; Smith 2012).

Verschiedene der vorgestellten Ansätze der Synthetischen Biologie zielen auf die Entwicklung von Therapeutika für gesundheitlich und sozioökonomisch besonders relevante Krankheiten ab, für die es laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) Lücken in der Gesundheitsversorgung sowohl in Europa als auch global gibt. Sie wurden deshalb von der WHO als prioritär für die Entwicklung von Medikamenten eingestuft (Kaplan/Laing 2004). Hierzu gehören außer Diabetes, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Krebs und HIV/Aids auch Tuberkulose, Malaria sowie »vernachlässigte« tropische Krankheiten (»neglected tropical diseases«) wie Denguefieber oder Leishmaniose. Darüber hinaus werden Infektionen durch antibiotikaresistente Bakterien sowie Pandemien durch Influenzaviren als besonders relevant in Bezug auf zukünftige Bedrohungen für die öffentliche Gesundheit eingeschätzt (Kaplan/Laing 2004). Auch diese beiden Anwendungsbereiche werden, wie beschrieben, von Ansätzen der Synthetischen Biologie adressiert.

Für einige dieser Therapiebereiche (Diabetes, Impfstoffe, vor allem aber Onkologie) werden für die nächsten Jahre die höchsten Ausgaben im Gesundheitswesen veranschlagt, und bereits in der Vergangenheit richtete sich ein Großteil der Arzneimittelentwicklung darauf (IMS 2012). Mittlerweile ist aber auch die Pharmakaentwicklung für seltene Erkrankungen (»orphan diseases«), wie Erbkrankheiten (z. B. Muskeldystrophien, Mukoviszidose) oder seltene Krebsarten, für (bio)pharmazeutische Firmen attraktiv (Melnikova 2012). Dies beruht einerseits auf gesetzlichen Regelungen, die direkte wirtschaftliche Anreize für Forschung und Entwicklung in verschiedenen Ländern (USA, Japan, Australien, EU-Staaten) geschaffen haben, und andererseits auf Faktoren wie einem höheren Preisniveau, geringeren Marketingkosten oder teilweise niedrigeren Hürden für die Zulassung und längeren Exklusivvertriebsrechten von Medikamenten für seltene Erkrankungen (Mee-

kings et al. 2012; Melnikova 2012). So entwickeln derzeit verschiedene Pharmafirmen Gentherapien für seltene Krankheiten (O'Reilly et al. 2013) und im November 2012 hat die Europäische Kommission ein erstes Gentherapeutikum, Glybera, das von der niederländischen Firma uniQure N. V. für die Behandlung von familiärer Lipoproteinlipasedefizienz entwickelt wurde, zugelassen (Büning 2013).

All dies spricht dafür, dass neue Forschungs- und Entwicklungsansätze im Pharmabereich, selbst wenn sie aufwendig erscheinen und ihre Erfolgsaussichten im Vorhinein schwer einzuschätzen sind, für das Gesundheitssystem, aber auch für Wissenschaft und Industrie von großer Bedeutung und Attraktivität sind.

Gleichzeitig dürfen regulatorische Fragen sowie Bedenken, die mögliche gesundheitliche oder ökologische Gefahren betreffen, nicht unterschätzt werden. Diese könnten die (sozioökonomische) Konkurrenzfähigkeit synthetisch-biologischer Ansätze in der Krankheitsbekämpfung gegenüber konkurrierenden Technologien und Verfahren beeinflussen. Dies betrifft zum Beispiel die Ansätze, die auf gentechnisch veränderten Stechmücken zur Reduktion von Wildpopulationen beruhen und im Rahmen möglicher Strategien zur Bekämpfung von Denguefieber in ersten Freilandversuchen auf den Kaimaninseln, in Malaysia und Brasilien getestet wurden (Lacroix et al. 2012; Oxitec 2011; Reeves et al. 2012). Umstritten waren und sind insbesondere die vorhergehenden Gesundheits- und Umweltrisikoabschätzungen (CSOs 2011; Enserink 2010; GeneWatch 2014; GeneWatch et al. 2012; Nature 2011; Reeves et al. 2012). Kritisiert wurde, dass die Versuche trotz ihrer grundsätzlichen Bedeutung und möglicherweise grenzüberschreitender Auswirkungen lediglich nationalen Regulierungen unterlagen (Mumford 2012; Reeves et al. 2012; siehe auch Kap. IV.1.5). Ein explizit sozioökonomischer Kritikpunkt gerade mit Blick auf ärmere Länder betrifft den Aspekt, dass die patentgeschützten Stechmücken – bei einem oder wenigen Anbietern – kontinuierlich nachgekauft werden müssten, um dauerhaft eine ausreichende Reduktion der Stechmückenpopulationen in den betroffenen Gebieten zu gewährleisten (Alphey et al. 2010; Harris et al. 2012).

Darüber hinaus wird diskutiert, ob eine Ausrottung bzw. weitgehende Reduktion einzelner Mückenpopulationen ungewünschte ökologische und epidemiologische Folgen haben könnte, z. B. in dem die (leere) Nische durch andere Mückenarten (mit möglicherweise anderen Krankheitserregern) eingenommen würde und/oder Effekte auf Nahrungsketten haben könnte (Alphey et al. 2010; Steinbrecher 2010).

Angesichts dieser teils massiven Kritik könnte eine kürzlich etablierte Strategie zur Bekämpfung von Denguefieber eine weniger umstrittene Alternative darstellen: Dabei werden die Stechmücken durch eine bakterielle Infektion resistent gegen den Dengueerreger gemacht, und die Stechmückenpopulation wird nicht minimiert, sondern ausgetauscht (Hoffmann et al. 2011; Walker et al. 2011). Dieser in Australien im Freiland erfolgreich erprobte Ansatz (Rasgon 2011) kommt ohne die Erzeugung/Ausbringung gentechnisch veränderter Insekten und damit auch ohne »synthetische« Proteine – die durch die Blutmahlzeit überlebender Weibchen in Menschen gelangen und theoretisch allergische Reaktionen auslösen könnten (Reeves et al. 2012) – aus.

Sozioökonomische Fragen zur möglichen Gefährdung der Lebensgrundlage von Bauern, die Artemisia-annua-Pflanzen in China, Indien, Vietnam und in Ostafrika anbauen, durch die synthetisch-mikrobielle Herstellung von Artemisinin (ETC Group 2007; Heemskerk et al. 2006; Noorden 2010) werden angesichts der kürzlich angelaufenen industriellen Produktion verstärkt diskutiert (Peplow 2013). Der Artemisininsyntheseweg in Hefe wurde ursprünglich an der UC Berkeley sowie im von

dort ausgegründeten Biotechnologieunternehmen Amyris entwickelt und ist in Zusammenarbeit mit den US-amerikanischen Non-Profit-Organisationen PATH und OneWorld Health sowie der französischen Firma Sanofi als Produktionspartner inzwischen zu einem industriellen Herstellungsverfahren entwickelt worden (PATH 2013; Peplow 2013). Mit der Auslieferung in verschiedene afrikanische Länder von Sanofis Medikament (ASAQ Winthrop®), das so hergestelltes Artemisinin enthält, wurde im August 2014 begonnen.[24] Das gesamte Projekt wurde von der Bill & Melinda Gates Foundation ab 2004 mit insgesamt mehr als 53 Mio. US-Dollar gefördert, OWH/PATH und Sanofi erhielten von UC Berkeley/Amyris eine gebührenfreie Lizenz für den Herstellungsprozess (Noorden 2010). Das mikrobiell hergestellte Artemisinin soll als stabile Quelle die Artemisiningewinnung aus Pflanzen (vorerst) nur ergänzen und Marktschwankungen ausgleichen, wie sie in den letzten Jahren aus verschiedenen Gründen (z. B. Verfügbarkeit von Hilfsfondsgeldern, Missernten durch Klimaschwankungen, lukrativerer Anbau von Nahrungsmitteln als Folge des Anstiegs der Nahrungsmittelpreise (Noorden 2010) vorkamen. Obwohl das so hergestellte Artemisinin zu Selbstkosten (»no profit – no loss«) angeboten werden soll (PATH 2013), wird das Verfahren vorerst verglichen zu pflanzlichem Artemisinin wohl keine niedrigeren Preise erlauben (Peplow 2013). Doch nicht nur die zukünftigen Herstellungskosten, sondern auch politische Entscheidungen von Regierungen und/oder Hilfsfonds darüber, in welchem Ausmaß eine in Zukunft möglicherweise günstigere mikrobielle Artemisininproduktion die traditionelle Produktion als Lebensgrundlage von Artemisia anbauenden Bauern ersetzen soll, werden das sozioökonomische Potenzial dieses Ansatzes bestimmen.

## Anwendungen im Umweltbereich 4.

Viele menschliche Aktivitäten, insbesondere im Bereich der Industrieproduktion, der Rohstoff- und Energiegewinnung sowie der Landwirtschaft, rufen sowohl auf regionaler als auch globaler Ebene Umweltbelastungen hervor, welche nicht nur die Ökosysteme, sondern häufig auch die Gesundheit und die Lebensverhältnisse von Menschen insgesamt gefährden (UNEP 2007). Dazu gehört die Verunreinigung von Böden und Wasser durch giftige Substanzen, die bei industriellen Herstellungsprozessen entstehen, sowie durch radioaktive Stoffe, Öl, Plastikabfälle, Agrarchemikalien und Pharmazeutika. Die spezifische Erfassung (Sensorik) und die Beseitigung (Remediation) von Umweltverschmutzungen sind deshalb von großem gesellschaftlichem Nutzen. Die Synthetische Biologie bietet für beide Anwendungsfelder neuartige Ansätze und Verfahren.

### Biosensorik 4.1

Sogenannte Bioreporter oder Biosensoren, die aus entsprechend gentechnisch ausgestatteten Mikroorganismen bestehen, sollen es ermöglichen, entweder in entnommenen Boden- oder Wasserproben (ex situ) oder direkt, z. B. in verunreinigten Böden (in situ), Schadstoffbelastungen anzuzeigen.

Für zellbasierte Biosensoren werden verschiedene Vorteile angeführt, die sie als Alternative oder als Ergänzung für analytisch-chemische Methoden attraktiv machen (Harms et al. 2006; Meer/Belkin 2010):

---

24 www.path.org/news/press-room/685/ (20.11.2015)

> Sie können diejenigen Schadstoffe/Schadstoffmengen messen, denen Organismen tatsächlich ausgesetzt sind (sogenannte »bioavailability«).
> Durch ihre geringe Größe haben Biosensoren das Potenzial, Kontaminationen mit sehr hoher räumlicher Auflösung anzuzeigen.
> Sie können eine erste, schnelle Untersuchung bezüglich toxischer Wirkungen von Kontaminationen auf Zellen ermöglichen.
> Verglichen mit apparativ aufwendigen chemisch-analytischen Methoden können sie einfache und kostengünstige Messungen in großem Maßstab erlauben.
> Unterschiedliche Bioreporter lassen sich kombinieren, um gleichzeitig verschiedene Substanzen zu detektieren und zu messen.

Genetisch veränderte Bakterienzellen, die in Anwesenheit des aromatischen Kohlenwasserstoffs Naphtalen Licht emittieren (sogenannte Biolumineszenz), wurden bereits 1990 beschrieben (King et al. 1990). Seither wurde eine Reihe gentechnisch veränderter Bakterien erzeugt, um die Anwesenheit verschiedener Substanzen zu erkennen und diese durch Licht- oder Farbreaktionen anzuzeigen, bislang meist im Rahmen von Laborexperimenten (Shin 2011).

Das grundlegende Konstruktionsprinzip solcher Biosensoren ist die Kopplung genetisch kodierter Sensor- und Regulationsmechanismen mit sogenannten Reportergenen, die aktiviert werden und Proteine für die jeweilige Reporterfunktion (z. B. Lichterzeugung, Farbreaktion) herstellen. Die eigentlichen Sensoren sind Proteine, die nach Bindung einer speziellen Substanz die Reportergene direkt oder indirekt stimulieren können. Bislang wurden natürlich vorkommende Sensorproteine (King et al. 1990; Trang et al. 2005), selektionierte Varianten solcher natürlichen Proteine (Garmendia et al. 2008) sowie synthetische, d. h. nicht in der Natur vorkommende, sondern gezielt veränderte Proteine (Looger et al. 2003) verwendet. Des Weiteren wurden synthetische RNA-Moleküle (sogenannte Aptamere oder Riboswitches) mit neuen Bindungsspezifitäten selektioniert, die als molekulare Schalter die Synthese von Proteinen regulieren können (Sinha et al. 2010).

Durch diese Ansätze konnten Bioreporter generiert werden, die Schwermetalle wie Arsen oder organische Substanzen wie aromatische Kohlenwasserstoffe, Sprengstoffe oder das Pflanzenschutzmittel Atrazin detektieren können (Garmendia et al. 2008; Sinha et al. 2010; Meer/Belkin 2010). Darüber hinaus gibt es Ansätze, die demonstrieren, dass es prinzipiell möglich ist, Signale von sehr vielen Bioreporterzellen mithilfe gekoppelter synthetischer Genschaltkreise und unter Verwendung von mikrosystemtechnischen Vorrichtungen (»microfluidic arrays«) zu integrieren. Diese Vorrichtungen ermöglichen es, eine Vielzahl von Zellen/Zellkolonien in mikroskopisch kleinen Behältnissen zu kultivieren und diese durch winzige Kanäle gezielt mit Kultur- und Testlösungen zu umspülen. Hierdurch können Messungen mit zellbasierten Biosensoren automatisiert und gleichzeitig funktionell robuster gemacht werden. So können z. B. auftretende Varianzen zwischen den Signalen einzelner Zellen durch Integration von Signalen vieler, funktionell gekoppelter Zellkolonien ausgeglichen werden (Prindle et al. 2012; Meer/Belkin 2010).

Trotz zahlreicher verbleibender technischer Herausforderungen (z. B. beim Erhalt der Lebensfähigkeit, dem biologischen Rauschen der Reporterfunktionen oder der Spezifität für die zu detektierenden Substanzen; Meer/Belkin 2010), konnte gezeigt werden, dass solche zellbasierten Bioreporter sowohl die großmaßstäbliche Messung gesammelter Proben mit einfachen Mitteln (ex situ) als auch die direkte Überwachung von Kontaminationen in Böden (in situ) ermöglichen können. So wurden Trinkwasserproben aus einer großen Zahl von Quellen in Vietnam (Trang et al. 2005) und Bangladesch (Siegfried et al. 2012) vor Ort zuverlässig auf Arsen untersucht. Für das Biosensorsystem

wurde ein genetischer Schaltkreis, der auf Arsen mit der Produktion von in einfachen Apparaten messbarem Licht reagiert, in Bakterien aus entsprechenden Sensormolekülen und einem Reportergen (Luciferasegen) kombiniert. Der von Wissenschaftlern des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung GmbH – UFZ entwickelte ARSOlux Biosensor, der keine Freisetzung der veränderten E.-coli-Bakterein vorsieht, wurde im Dezember 2012 von der ZKBS (2012c) als sicher bewertet, beim Biosafety Clearing-House (BCH), eine Einrichtung des Secretariat of the Convention on Biological Diversity (SCBD), eingetragen und im Juni 2013 in der Mongolei getestet. Der ARSOlux Biosensor soll demnächst kommerziell vertrieben werden[25] (Kap. III.4.4).

Weiterhin konnte in einer der wenigen Studien unter simulierten Freilandbedingungen (d. h. in großen Behältnissen mit natürlichem Boden) gezeigt werden, dass das bereits erwähnte, seit Langem etablierte Modellbioreportersystem für Naphtalen – in Form des gentechnisch veränderten Bakteriums Pseudomonas fluorescens HK44 – über mehrere Jahre funktionell sein kann und damit Naphthalenbelastungen in Böden langfristig verfolgt werden könnten (Ripp et al. 2000; Trögl et al. 2012).

## Biosanierung (Bioremediation) 4.2

Auch sehr stabile organische Substanzen, wie z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe oder polychlorierte Biphenyle (PCB), können durch natürlich vorkommende Mikroorganismen abgebaut werden (Megharaj et al. 2011). Schwermetalle und Radionuklide wiederum können durch Mikroorganismen aufgenommen und immobilisiert oder zu weniger schädlichen Formen umgewandelt werden (Lloyd/Renshaw 2005; Watanabe 2001). Diese sogenannte intrinsische Bioremediation kann durch das Einbringen von Nährstoffen oder Chemikalien (Biostimulation) oder von zusätzlichen Mikroorganismen (Bioaugmentation) verstärkt werden (Megharaj et al. 2011). Auch Pflanzen können für Bioremediationsprozesse eingesetzt werden (Phytoremediation).

Mit dem Ziel einer effizienteren Bioremediation wurden Mikroorganismen, aber auch Pflanzen, bereits seit Ende der 1980er Jahre gentechnisch verändert (Singh et al. 2011; TAB 2005, S. 186 ff.). Hierfür wurden Gene anderer Organismen übertragen, die es den Bakterien oder Pflanzen ermöglichen, Schwermetallsalze oder Radionuklide aufzunehmen (Lange et al. 1998; Renninger et al. 2004; Singh et al. 2009; Valls et al. 2000). Auch wurden in Bakterien bereits sehr früh teilweise komplexe, metabolische Abbauwege durch die Kombination von Teilabschnitten verschiedener Stoffwechselwege konstruiert, um organische Chemikalien (einschließlich bestimmter Pflanzenschutzmittel oder Sprengstoffe) abbauen zu können (Haro/Lorenzo 2001; King et al. 1990; Lange et al. 1998; Rojo et al. 1987; Sinha et al. 2010). Diese Ansätze, denen das Prinzip der Kombination von biologischen Elementen zur Generierung neuer Funktionen zugrunde liegt, können als explizite Frühformen der Synthetischen Biologie bezeichnet werden, zu einer Zeit, in der dieser Begriff noch lange nicht in seiner heutigen Bedeutung verwendet wurde (Kap. II.1).

In einem anderen Fall wurde ein spezielles Enzym für die Reduktion toxischer Stickoxide optimiert. Dabei wurde Myoglobin aus Säugetieren in eine funktionsfähige Stickoxidreduktase umgewandelt, indem eine Aminosäure so modifiziert wurde, dass eine zusätzliche Bindungsstelle für Eisen entstand. Eisen wiederum ist ein essenzieller Kofaktor für Reduktaseaktivität. Im Ergebnis entstand so eine »synthetische« Stickoxidreduktase (Köhler/Ward 2010). Da natürliche Bioremediationsvor-

25 www.ufz.de/arsolux/index.php?de=20675 (20.11.2015)

gänge oft von »Konsortien« von Mikroorganismen (und teilweise Pflanzen) abhängen, wurden darüber hinaus Versuche unternommen, gentechnisch veränderte Konsortien aus mehreren Organismen herzustellen (Barac et al. 2004; Gilbert et al. 2003).

Der Funktionsnachweis all dieser gezielt veränderten Organismen wurde bislang lediglich im Labor erbracht, zum Teil unter simulierten Freilandbedingungen. Lediglich transgene Bäume wurden in begrenztem Umfang in kontrollierten Freisetzungsversuchen getestet (Biosicherheit 2012b; TAB 2005, S. 186 ff.).

## Kombination von Biosensorik und Biosanierung 4.3

Das oben erwähnte gentechnisch veränderte Bakterium Pseudomonas fluorescens HK44 repräsentiert nicht nur ein Bioreportersystem für Naphtalen, sondern kann diese Verbindung gleichzeitig abbauen (King et al. 1990). Um in entsprechender Weise Biosensorik und Biosanierung möglichst in einem Organismus bzw. in einer Bakterienzelle kombinieren zu können, werden vermehrt die Möglichkeiten sogenannter Riboschalter untersucht (Riboswitches). Unter Riboschaltern versteht man RNA-Elemente, die kleine Moleküle binden und in Abhängigkeit von dieser Bindung die Synthese von Proteinen regulieren können. Auf diese Weise können sogenannte »designerauxotrophe« Mikroorganismen konstruiert werden, deren Überlebensfähigkeit von der Verfügbarkeit bestimmter kleiner Moleküle abhängt, die nicht Bestandteil des natürlichen Metabolismus sind (Desai/Gallivan 2004).

Ebenso konnten Mikroorganismen entwickelt werden, die in der Lage sind, auf bestimmte kleine Moleküle zu reagieren, die sie normalerweise nicht erkennen können (Sinha et al. 2010; Topp/Gallivan 2007). Ein Beispiel hierfür ist ein Stamm von E. coli, der in der Lage ist, das Herbizid Atrazin mithilfe eines atrazinsensitiven synthetischen Riboschalters zu erkennen, sich in Richtung dieser Substanz zu bewegen und diese schließlich abzubauen. Konkret wurde dies erreicht, indem ein Riboschalter entwickelt wurde, der die Herstellung eines Proteins kontrolliert, das essenziell für die Beeinflussung der Bewegung des Bakteriums durch chemische Stoffe in dessen Umgebung ist. Zusätzlich wurde ein Gen eingeführt, das ein Enzym für die Spaltung von Atrazin kodiert (Sinha et al. 2010).

## Zum ökonomischen Potenzial von Biosensorik und Biosanierung 4.4

Gentechnisch veränderte Mikroorganismen (GVMO) als zellbasierte Biosensoren können einfach und kostengünstig Messungen von toxischen Stoffen in Boden- oder Wasserproben erlauben. Der ARSOlux Biosensor (Kap. III.4.1.) scheint nun der erste kommerziell angebotene zu sein. Bei sachgemäßem Gebrauch, bei dem die Probentestung in einem stabilen Glasröhrchen in einem Messfahrzeug durchgeführt wird, werden keine GVMO in die Umwelt freigesetzt. Sollte dies dennoch passieren, gilt der verwendete Laborstamm von E. coli als gesundheitlich unbedenklich sowie nur wenig überlebensfähig (ZKBS 2012c). Die Entwickler im UFZ scheinen damit einen Weg gefunden zu haben, eine sichere Anwendung auch außerhalb von speziellen Laboren zu gewährleisten, die auch unter den Bedingungen von Entwicklungsländern praktikabel ist. Ob das Verfahren allerdings auch ökonomisch erfolgreich sein wird, kann sich erst in Zukunft erweisen. Auf einem Workshop des britischen Centre for Synthetic Biology and Innovation (CSynBI) am Imperial College London

im April 2013 wurde der ARSOlux Biosensor als eines der ganz wenigen Beispiele für die Nutzung von GVMO intensiv diskutiert (Marris/Jefferson 2013a). Dabei wurde deutlich, dass es wohl gar nicht so sehr die technischen und Sicherheitsfragen waren, die einer Entwicklung und Vermarktung in Entwicklungsländern entgegenstanden, sondern dass z. B. in Bangladesch behördenseitig die Verbesserung der Arsentestung im Vergleich zu anderen Maßnahmen keinen besonderen Stellenwert einnahm und deshalb die Forschergruppe zunächst keine große Unterstützung bekam. Festgehalten wurde auch, dass der ARSOlux Biosensor durchaus ein typisches Beispiel für ein technologiebasiertes Herangehen ist, bei dem die Problemanalyse nicht am Anfang stand (Marris/Jefferson 2013a, S. 14 ff.).

Im Fall der In-situ-Bioremediation scheidet eine geschlossene Anwendung ohne Freisetzung von GVMO/SVO aus. Mögliche negative ökologische Auswirkungen und die technischen Schwierigkeiten, eine unkontrollierte Verbreitung durch biologische Sicherheitsmaßnahmen (wie eingebaute zelluläre »Suizidmechanismen«) komplett zu verhindern (Kap. IV.1.4), dürften daher die Hauptgründe dafür sein, dass bis heute weltweit kein gentechnisch hergestellter Organismus für eine Bioremediation in situ eingesetzt oder gar kommerzialisiert wurde (Ezezika/Singer 2010; Trögl et al. 2012). Hinzu kommt, dass für die Entfernung einiger wichtiger Kontaminationen durch organische Substanzen (wie z. B. Öl) gut angepasste natürliche Mikroorganismen bzw. Konsortien von Mikroorganismen existieren. All dies macht die Kommerzialisierung von GVMO wenig attraktiv (Ezezika/Singer 2010; Megharaj et al. 2011; Watanabe 2001). Systembiologische Ansätze zum Verständnis von Bioremediationsprozessen, der beteiligten Mikroorganismen und ihrer Stoffwechselwege könnten allerdings sowohl die Nutzung natürlich vorkommender Organismen optimieren wie auch die Herstellung von effizienteren GVMO für Bioremediationsaufgaben befördern (Chakraborty et al. 2012; Ramos et al. 2011).

## Biomaterialien 5.

Unter Biomaterialien können zwei unterschiedliche Kategorien verstanden werden: Zum einen werden als Biomaterialien Werkstoffe auf biochemischer Basis bezeichnet, zum anderen fallen darunter alle Arten von Materialien, Oberflächen oder Konstruktionen, die mit biologischen Systemen in Wechselwirkung stehen. Die erste Kategorie gehört zum Anwendungsbereich Chemie/Werkstoffe (Kap. III.1), im Folgenden geht es um Ansätze der Synthetischen Biologie zur Entwicklung neuer Biomaterialien als zweite Kategorie.

Interagierende Biomaterialien werden für eine ganze Reihe unterschiedlicher Anwendungen vor allem auf der Nanoebene erforscht. Hierzu zählt die Nutzung biologischer Systeme bei der Konstruktion elektronischer Schaltkreise sowie für Transportvorgänge, Informationsspeicherung und Lichtabsorption im Nanobereich (IRGC 2011). So wurden beispielsweise Peptide entwickelt, die in der Lage sind, verschiedene anorganische Materialien (wie z. B. Halbleiter) zu erkennen und zu binden. Diese Moleküle können als Schablonen für den Zusammenbau funktionaler anorganischer Partikel oder Dünnschichten eingesetzt werden (Sarikaya et al. 2003; Whaley et al. 2000). Diese Strategie zählt streng genommen nicht zur Synthetischen Biologie, zeigt aber auf, wo für Biomaterialien künftig Potenziale für die Synthetische Biologie liegen können. Derartige »Biokristallisationsprozesse« könnten im Sinne einer Synthetischen Biologie gezielt konstruiert und gegebenenfalls mit weiteren Schalterelementen verknüpft werden. Ein anderes Beispiel für diese Strategie umfasst

die Nutzung von modifizierten Viruspartikeln als Schablonen für die Kristallisation von metallischen und magnetischen Nanodrähten (Mao et al. 2003).

Ein anderes Anwendungsfeld macht sich die Fähigkeit biologischer Zellen zunutze, komplexe Aufgaben auf kleinstem Raum erfüllen zu können. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung molekularer Motorproteine für die Bewegung mikroskopischer Metallteilchen (Soong et al. 2000). Solche molekularen Motoren können auch durch Lichtimpulse angetrieben werden oder als Biohybridmotoren konstruiert werden, indem Enzyme kinetische Energie erzeugen (Eelkema et al. 2006).

Schließlich gibt es Forschungsarbeiten mit dem Ziel, die hochspezifischen Transporteigenschaften von Proteinen für technische Transportvorgänge zu nutzen. Proteine üben in biologischen Systemen vielfältige Transportaufgaben aus und sind in der Lage, kleine Moleküle und Objekte in Zellen zu bewegen. Diese molekularen »shuttles« könnten beispielsweise zur Reparatur von molekularen Defekten in Hochleistungsmaterialien eingesetzt werden.

Durch das zunehmende Verständnis über Biopolymersynthese können sogenannte Biohybridmaterialen hergestellt werden, die ihre physikalischen oder (bio)chemischen Eigenschaften in regulierbarer Weise ändern. Solche Materialien können durch die Kopplung von nichtbiologischen Polymeren (wie z. B. Polyethylenglykol oder Polyacrylamid) mit – teilweise speziell konstruierten – regulatorischen biologischen Komponenten wie Proteinmodulen und/oder DNA-Elementen hergestellt werden. In Abhängigkeit von der Zugabe bestimmter Substanzen, die an die biologischen Komponenten binden und deren Funktionen modulieren, können die Verzweigungen solcher Polymere und damit ihre mechanischen Eigenschaften verändert werden (Hotz 2013). Solche Biohybridmaterialien könnten beispielsweise für extern induzierbare Gerüststrukturen in der regenerativen Medizin (Rehmann/Kloxin 2013) oder für Depotstrukturen im Körper zur steuerbaren (und wiederholten) Freisetzung von Impfstoffen (Gübeli et al. 2013) genutzt werden. Umgekehrt ist auch das gezielte und steuerbare Binden bzw. Entfernen von (unerwünschten) Stoffen aus der Umgebung denkbar.

## Fazit zum Potenzial der Anwendungsfelder 6.

Lange Zeit wurde der Nutzung der Synthetischen Biologie für die Herstellung sowohl von Fein- und Spezial- als auch von Massenchemikalien und für die Energieproduktion das größte Potenzial zugesprochen. Hierfür sprach, dass in diesen Bereichen weltweit eine Reihe unternehmerischer Aktivitäten sowie eine massive Investition vor allem in den Bioenergiebereich zu beobachten waren. Sowohl im Grundchemikalien- als auch im Energie- und Kraftstoffbereich ist allerdings zu bedenken, dass es sich um riesige Massenmärkte handelt, in denen sich neue Verfahren gegenüber seit Jahrzehnten etablierten und kostenoptimierten Technologien durchsetzen müssen. Darüber hinaus scheint eine schwankende und insgesamt rückläufige Ölpreisentwicklung seit der Finanzkrise 2007/2008 Auswirkungen auf das Engagement insbesondere der großen erdölverarbeitenden Unternehmen gehabt zu haben (Kap. III.2.5).

Die Schwierigkeiten bei der Durchsetzung gegenüber konventionellen Verfahren verdeutlicht auch das Beispiel der Weißen bzw. industriellen Biotechnologie, also der Vorläufertechnologie der Synbio (TAB 2015a und b): Obwohl deren Potenzial seit Jahrzehnten erkannt und auch in großem Umfang öffentlich gefördert worden ist, hat sich der Anteil an der chemischen (Grund-)Stoffproduktion nur sehr langsam entwickelt. Ob die Synbio hier in Zukunft zu einer deutlich dynamischeren Ent-

wicklung beitragen wird, muss sich zeigen. Wenn für die Produktion (weiterhin) geschlossene Systeme genutzt werden, werden eine Zulassung und öffentliche Unterstützung weitaus leichter fallen, als wenn Synbio-Organismen in offenen bzw. halboffenen Anlagen genutzt werden sollen.

Die zukünftige Entwicklung wird vom weiteren Engagement öffentlicher und privater Investoren abhängen, wobei deren Motive durchaus heterogen sind. Während für die öffentliche Forschungsförderung die Nachhaltigkeitsfrage im Vordergrund steht (bzw. stehen sollte), geht es für die Industrie vor allem um die Sicherstellung ihrer künftigen Geschäftsgrundlage. Trotz des jüngsten Ölpreisverfalls ist anzunehmen, dass diese Zielstellungen im Lauf der nächsten Jahre immer stärker in Richtung einer Wirtschaftsweise auf Basis nachwachsender und klimafreundlicherer Rohstoffe konvergieren (Stichwort: Bioökonomie), was natürlich nicht bedeutet, dass über die zu präferierenden Wege dorthin Einigkeit herrschen wird. Dennoch spricht diese gemeinsame Zielperspektive grundsätzlich für ein großes Potenzial aller biobasierten Produktionsstrategien.

Prinzipiell ist mit Blick auf Landwirtschaft und Biomassenutzung zu beachten, dass es sich um hochkomplexe Systeme handelt, deren Ausrichtung und Resultate von natürlichen Bedingungen, soziokulturellen, wirtschaftlichen und politischen Traditionen und Rahmenbedingungen sowie der Anwendung wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse und Produkte geprägt werden. Wie bereits in Kapitel III.1 angemerkt, müssen die Bioenergieerzeugung, die biobasierte Chemieproduktion und die Lebensmittelerzeugung in Einklang gebracht werden. Die Suche nach einer integrierten Biomassenutzungsstrategie ist daher ein sehr komplexes und herausforderndes Vorhaben von Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und (Zivil-)Gesellschaft.

Angesichts der Schwierigkeiten in den Niedrigpreismassenmärkten spricht vieles dafür, dass die ökonomisch aussichtsreichere Perspektive der Synbio-Anwendungen in den kommenden Jahren bei kleinvolumigen, aber hochpreisigen Produkten liegen wird, bei Spezialchemikalien und vor allem im Gesundheitsbereich, d. h. bei Pharmaka, sonstigen Therapeutika, Impfstoffen sowie gen- und zellbasierten Therapien. Hier dürften weder die Kostenfrage noch Biosicherheitsaspekte eine so große Rolle für den (kommerziellen) Erfolg synthetisch-biologischer Ansätze wie auf den Massenmärkten spielen, weil einerseits auch die bisherigen bzw. alternativen Verfahren aufwendig sind und weil andererseits entweder in sichereren geschlossenen Systemen gearbeitet werden kann (Spezialchemikalien) oder potenzielle Risiken/Nebenwirkungen eher in Kauf genommen werden (Pharmaka/Therapeutika). Hier wird es vor allem auf die tatsächliche Überlegenheit gegenüber heutigen und zukünftigen Produktions- bzw. Behandlungsverfahren ankommen. Eine solche Überlegenheit ist im Vorhinein allerdings kaum abschätzbar, auf jeden Fall lassen sich keine übergreifenden, kategorialen Einschätzungen treffen.

Bei biobasierten Materialien und im Umweltbereich gilt Analoges: Medizinische oder technische Spezialanwendungen rechtfertigen aufwendigere Produktionsverfahren; Massenprodukte zu ersetzen, ist enorm schwer. Dies spricht tendenziell gegen Bioremediation (im größeren Stil) und für Anwendungsmöglichkeiten in der Biosensorik, bei der es ja auch mit dem ARSOlux Biosensor ein erstes erfolgreiches Beispiel gibt. Allerdings ist auch hier noch einmal darauf hinzuweisen, dass es sich wie bei allen anwendungsreifen Entwicklungen um Projekte der Synbio eher i. w. S. handelt.

Eine gewisse Sonderfrage bildet der verbrauchersensible Bereich der Aroma- und Duftstoffe oder anderer Inhaltsstoffe für die Lebensmittel-, Kosmetik- und Reinigungsmittelindustrie. Obwohl hier teils seit Langem gentechnologische Verfahren eingesetzt werden, dürfte die Anwendung von weiterentwickelten Synbio-Verfahren auch in Zukunft deutlich mehr öffentliche Aufmerksamkeit und

Kritik erfahren, wie es im vergangenen Jahr bereits der Fall war (Kap. III.1). Neben der technischen und ökonomischen Leistungsfähigkeit werden vor allem die Bewertung der ökologischen Risiken und Vorteile (Kap. IV.1), aber auch die weiter gehende öffentliche gesellschaftliche Akzeptabilität bzw. Akzeptanz, die auch von Weltanschauungen und Wertvorstellungen (wie z. B. über Natürlichkeit) abhängig ist, darüber entscheiden, ob Anwendungen der Synbio (i. w. S. und i. e. S.) auf längere Sicht in relevantem Umfang genutzt werden. Welche Handlungsoptionen sich für eine künftige Forschungspolitik ergeben, wird im abschließenden Kapitel VII diskutiert.

# BIOSAFETY UND BIOSECURITY – SICHERHEITSFRAGEN DER SYNTHETISCHEN BIOLOGIE IV.

Staatliches bzw. politisches Handeln im Bereich der Erforschung, Entwicklung und Anwendung neuer Technologien wird mit am stärksten und eindeutigsten durch mögliche Gefahren für die Umwelt insgesamt und die menschliche Gesundheit im Besonderen begründet. Deren Abwehr bzw. Minimierung (als Teil der öffentlichen Risikovorsorge) ist das Ziel rechtlicher Regelungen bis hin zu einem gesetzlich verankerten Zulassungserfordernis, u. a. für Arzneimittel, neuartige Therapien, Medizinprodukte, Chemikalien und – im Fall der Synbio besonders einschlägig – gentechnisch veränderte Organismen (GVO).

Die angezielten positiven Effekte der öffentlichen Forschungs- und Innovationsförderung (als Teil der sozioökonomischen Zukunftsvorsorge) können nur auf Grundlage von verlässlichen Rahmenbedingungen realisiert werden. Daher muss die frühzeitige Befassung mit möglichen Risiken sowie der Frage, ob bzw. wie diese gegen potenzielle gesellschaftliche Nutzen abgewogen werden können, kein Zeichen für eine übertrieben kritische oder gar forschungspessimistische Haltung sein – sie scheint vielmehr gerade dann geboten, wenn mit einem Technologiebereich große Erwartungen an ein zukünftiges Problemlösungspotenzial verbunden werden, wie es bei der Synbio im engeren und im weiteren Sinn bei vielen Akteuren der Fall ist.

Es ist somit nicht überraschend, dass Fragen der biologischen Sicherheit – neben den ebenfalls »risikoorientierten« Fragestellungen im Bereich des geistigen Eigentums sowie ethischen/moralischen Bedenken bezüglich fundamentaler molekularbiologischer Eingriffe (Stichworte: »playing God«, »tinkering with nature«) – die inner- und außerwissenschaftliche Debatte von vornherein begleitet haben. Sie haben beispielsweise in der Stellungnahme der EGE (2009) eine große Rolle gespielt.

Allerdings führen dabei die Unklarheit des Synbio-Begriffs (Kap. II) sowie das frühe Stadium und die enorme Heterogenität der möglichen Anwendungen (Kap. III) naturgemäß zu einer großen Unschärfe. Nachdem die meisten Produkte und Verfahren der Synbio am Anfang ihrer Entwicklung stehen (wenn sie sich nicht überhaupt noch in einem konzeptionellen Frühstadium befinden), sind auch ihre möglichen sicherheitsrelevanten Eigenschaften wie Toxizität, Allergenität, Ausbreitungsverhalten oder Überlebensfähigkeit weitgehend unbekannt.

In Verbindung mit der Diskussion über das Wesen und die Neuartigkeit der Synbio fokussiert die (biologische) Sicherheitsdebatte daher seit Längerem auf die Frage bzw. Prüfung, ob die heutigen und absehbaren Entwicklungen (noch) unter die jetzigen Regulierungen (für Arzneimittel, neuartige Therapien, Medizinprodukte, Chemikalien und vor allem GVO) fallen bzw. von diesen angemessen erfasst werden oder ob die Kategoriengrenzen gesprengt werden und bestehende Verfahren der Risikoabschätzung und des Risikomanagements nicht mehr (angemessen) greifen. Diese politisch bedeutsame Frage bildet auch das Kernthema des folgenden Kapitels IV.1 (Biosafety).

Kapitel IV.2 widmet sich dann einem anderen Themenkomplex, der die Debatte über die Synbio ebenfalls seit Längerem befeuert hat, aber in den vergangen drei Jahren noch einmal enorm an wissenschaftlicher und politischer Bedeutung gewonnen hat: Die Frage nach der Biosecurity, d. h. nach dem Schutz vor illegalem (Biocrime) oder sonstigem böswilligem (Bioterror) Gebrauch biologischer Agenzien bzw. des zugrundeliegenden Wissens. Auch wenn vieldiskutierte und umstrittene

Experimente (v. a. mit Vogelgrippeviren), die mit der Gefahr eines solchen Missbrauchs in Zusammenhang gebracht wurden, bislang vorrangig nicht aus Forschungsvorhaben der Synbio kamen, so verbinden sich doch mit Szenarien einer zukünftigen Synthetischen Biologie weit reichende Befürchtungen und haben bereits zu ersten Regulierungsbemühungen geführt. Einen Sonderfall bildet der Bereich der DIY-Biologie, in dem eine (versehentliche) biologische Gefährdung durch bewusste oder unbewusste Nichtbeachtung von Sicherheitsstandards (Bioerror) in Zukunft ein Problem werden könnte (und die Grenzziehung zwischen Biosafety und Biosecurity schwierig macht). Diese Thematik wird vertieft in Kapitel VI.4.4 aufgegriffen.

## Biosafety – Schutz vor unerwünschten ökologischen und gesundheitlichen Folgen 1.

Die Frage nach der Definition und der begrifflichen Abgrenzung der Synbio vor allem gegenüber der Gentechnik muss bei der Betrachtung des Forschungs-, Entwicklungs- und Anwendungsstandes nicht unbedingt schlüssig beantwortet werden – mit Blick auf die (Risiko-)Regulierung aber sehr wohl. Dabei geht es einerseits um die formale Frage, ob die bestehenden Regulierungskategorien, -systeme und -mechanismen greifen. Andererseits stellt sich die inhaltliche Frage, ob die jeweiligen Synbio-Ansätze und Produkte neuartige Risiken für Umwelt und Gesundheit hervorrufen können, die mit dem vorhandenen Instrumentarium der Risikoabschätzung und des Risikomanagements nicht angemessen erfasst und gehandhabt werden können.

### Status quo: Noch greifen die bestehenden Regularien 1.1

DFG, acatech und Leopoldina folgerten in ihrer Stellungnahme 2009, dass »[b]ezüglich der biologischen Sicherheit (Biosafety) und des Missbrauchsrisikos (Biosecurity) ... die bestehenden Gesetze in Deutschland nach dem heutigen Forschungsstand ausreichend [seien]. Aufgrund der dynamischen und vielfältigen Entwicklungen [wurde] jedoch empfohlen,

> die Zentrale Kommission für die Biologische Sicherheit (ZKBS) zu beauftragen, ein wissenschaftliches Monitoring durchzuführen, um die aktuellen Entwicklungen sachverständig und kritisch zu begleiten und
> für Freisetzungen und Handhabung in geschlossenen Systemen von Organismen der Synthetischen Biologie, die keinen Referenzorganismus in der Natur haben, klar definierte Kriterien zur Risikoabschätzung festzulegen« (DFG et al. 2009, S. 9).

Diesem Beobachtungsauftrag kam die ZKBS nach und legte im November 2012 einen ersten, knapp 10-seitigen Bericht vor. Darin wurde ein Überblick über einschlägige Forschungsaktivitäten in Deutschland gegeben und »die vorgestellten Teilbereiche der Synthetischen Biologie daraufhin untersucht, ob sich in diesen Bereichen Gefährdungen für die biologische Sicherheit ergeben und ob die Forschungsvorhaben vom Geltungsbereich des GenTG erfasst werden« (ZKBS 2012a, S. 4). Die untersuchten Teilbereiche der Synthetischen Biologie umfassten die typischen Verfahren (Kap. II.1): das Design und die Synthese von Genen und Genomen, das Design von maßgeschneiderten Stoffwechselwegen, die Xenobiologie, die Erzeugung von Minimalorganismen und die Schaffung von künstlichen Zellen sowie die Konzeption von genetischen Schaltkreisen (ZKBS 2012a, S. 4). Zusammenfassend kam die ZKBS (2012a, S. 11) zu dem Schluss, »dass die derzeit in

Deutschland in der Synthetischen Biologie verfolgten Forschungsansätze kein Biosicherheits-spezifisches Gefährdungspotenzial bergen, das über das von ›klassischen‹ gentechnischen Versuchen hinausgeht und dem nicht durch die konsequente Anwendung des GenTG begegnet werden kann. Beim aktuellen Stand der Forschung werden alle Forschungsansätze mit Ausnahme der Synthese von Nukleinsäuren vom GenTG erfasst.« Darüber hinaus ergänzte die ZKBS (2012a, S. 11): »Einzelne Teilbereiche der Erforschung von künstlichen Zellen, wie die Untersuchung von bakteriellen Zellteilungssystemen, finden *in vitro*, also außerhalb lebender Systeme, statt und werden daher nicht vom GenTG erfasst. Diese Versuche bergen kein spezifisches Gefährdungspotenzial, da es sich nicht um lebensfähige Organismen handelt. Zurzeit ist es nicht möglich, sich eigenständig replizierende biologische Systeme herzustellen.«

Grundsätzliche Übereinstimmung darüber, dass die gegenwärtigen Regularien bzw. darauf beruhende Ansätze der Risikoabschätzung derzeit noch ausreichend sind, besteht auch bei Gremien auf europäischer Ebene (Buhk 2014; Pauwels et al. 2013; SCHER et al. 2014b). Bereits Ende 2008 hat die EU-Kommission eine New Techniques Working Group (NTWG) eingesetzt, die überprüfen sollte, ob die erwartbaren Resultate neuer Biotechnologien unter die einschlägigen Richtlinien für GVO 2009/41/EG (für geschlossene Systeme, »contained use«) und 2001/18/EG (für Freisetzungen) fallen (Buhk 2014, S. 529). Einer der deutschen Vertreter in dieser Arbeitsgruppe, der langjährige Leiter Abteilung Gentechnik in der Fachbehörde BVL Hans-Jörg Buhk, fasste im Dezember 2014 die Einschätzungen zur Synbio dahingehend zusammen, dass die beiden Richtlinien (in Verbindung mit der Verordnung (EG) Nr. 428/2009 [Dual Use]; Kap. IV.2.2.1) als ausreichend angesehen werden, um die Biosicherheit (Biosafety und Biosecurity) zu gewährleisten (Buhk 2014, S. 531). Der Abschlussbericht der NTWG hatte keine Hinweise auf eine akute Revisionsbedürftigkeit der europäischen Regulierung ergeben (Buhk 2014, S. 529).

Zu einer ähnlichen Lageeinschätzung bezüglich existierender (Biosafety-)Regularien kamen Vertreter von 15 nationalen europäischen Biosicherheitsgremien, der European Food Safety Authority (EFSA), der EU-Kommission sowie ausgewählte Forscher bei einem im Dezember 2012 in Paris organisiertem Workshop von ZKBS, dem französischen Haut Counceil des Biotechnologies (HCB), der niederländischen Commissie Genetische Modificatie (COGEM) und dem belgischen Service de Biosécurité et Biotechnologie (SBB) des l'Institut scientifique de Santé publique (ISP). Die Ergebnisse wurden in einem ausführlichen Konferenzbericht veröffentlicht (Pauwels et al. 2013). Basierend auf den Erfahrungen nationaler Beratungsgremien und den Ergebnissen des Workshops wurde es als schwer vorstellbar angesehen, dass Mikroorganismen oder Entitäten in absehbarer Zeit (»next few years« bzw. »near future«) hergestellt werden, die sich stark von existierenden Organsimen unterscheiden. Es stünden genügend Wissen und angemessene Vergleichsorganismen zur Verfügung, und die gegenwärtigen Risikobewertungsmethoden stellten ein gute Rahmenordnung dar, um potenzielle Risiken abzuschätzen (Pauwels et al. 2013, S. 223).

Auch eine Expertengruppe dreier wissenschaftlicher Komitees der EU-Kommission zum Thema Risikoabschätzungsmethodik und Sicherheitsaspekte der Synbio kam in einer im Dezember 2014 veröffentlichten (vorläufigen) Stellungnahme (SCHER et al. 2014b, S. 42) in Bezug auf die gegenwärtige Synbio zu einem ähnlichen Schluss, hob aber gleichzeitig deutlich hervor, dass die derzeit noch passenden, existierenden Methoden und Prinzipien der Risikobewertung mit fortschreitender Entwicklung bestimmter Methoden und Produkte der Synbio schon bald nicht mehr ausreichend sein könnten (»will soon be challenged«).

## Zukünftige Herausforderungen für die Risikobewertung in Deutschland und der EU 1.2

Zukünftige Herausforderungen durch das Voranschreiten von Synbio-Ansätzen werden von den genannten verschiedenen Kommissionen und Gremien in Bezug auf drei fundamentale Aspekte gesehen: die Nichtanwendbarkeit der bestehenden Definitionen von GVO auf mithilfe der Synbio veränderte Organismen (SVO), das Versagen der etablierten Risikobewertungsverfahren auf der Grundlage von Ähnlichkeit und Vertrautheit sowie die Infragestellung des bisherigen Prinzips der Einzelfallprüfung im Stufenverfahren.

### NICHTANWENDBARKEIT DER BESTEHENDEN GVO-DEFINITION

Die Definitionen in den existierenden Vorschriften von »Organismus« und genetisch modifiziertem Organismus« (einschließlich Verfahren der Veränderung genetischen Materials in diesem Sinne) könnten für manche Ansätze nicht mehr greifen. So wurde von Buhk (2014) mit Blick auf (zukünftige) Produkte der Synbio i. e. S. auf eine gewisse Unklarheit der Definition von GVO verwiesen und die Bedeutung der »aufnehmenden Umgebung« betont. Die einschlägigen Richtlinien 2009/41/EG und 2001/18/EG definieren als (Mikro-)Organismen jede biologische Entität, die sich vervielfältigen und genetisches Material übertragen kann (»replicating and transfering genetic material«), einschließlich zellulärer und nichtzellulärer Mikroorganismen wie Viren, Viroide sowie tierische und pflanzliche Zellen in Kultur. Die Übertragung eines synthetischen/»nachgebauten« Genoms in eine »entkernte«, aber ansonsten »kompetente« Zelle (wie beispielsweise durch die Arbeitsgruppe von Craig Venter; Kap. V.1.1), würde laut Buhk (2014, S. 530) unter die Richtlinien fallen, nicht aber eine Kombination des Genoms mit (ebenfalls synthetischen) Protozellen und/oder Zellextrakten.

Insbesondere auch weitere Entwicklungen im Bereich von Protozellsystemen (Kap. II.2) wurden mit Fragen bezüglich der Definition von GVO in Zusammenhang gebracht und damit danach, ob solche Ansätze von den existierenden Regularien erfasst werden. So werden von der GVO-Definition (Richtlinie 2001/18/EG bzw. deutsches GenTG) Organismen erfasst, deren »genetisches Material in einer Weise verändert wurde, wie sie unter natürlichen Bedingungen durch Kreuzung oder natürliche Rekombination nicht vorkommt«. Die ZKBS (2012a, S. 9) interpretierte dies so, dass das GenTG somit für bekannte Organismen gilt, deren Genome verändert werden, aber nicht Organismen einschließt, deren Genom ohne natürliches Vorbild konstruiert wurde. Auch spezifiziert die GVO-Definition die chemische Natur des genetischen Materials nicht. Dies wird von manchen Experten so ausgelegt, dass chemisch andersartige genetische Materialien (XNA; Kap. II.2) von den GVO-Definitionen/Vorschriften erfasst werden (SCHER et al. 2014b, S. 34), während dies von anderen Experten infrage gestellt wird (Pauwels et al. 2013, S. 223).

Des Weiteren könnten manche gezielten Veränderungen im Erbgut, die durch neue, molekulare »Werkzeuge« (mit programmierbaren Zielspezifitäten), wie ZFN, TALEN, CRISPR/Cas (Cong et al. 2013; González et al. 2014), oder oligonukleotidvermittelte Mutagenesetechniken (wie »microarray and gene experiment« [MAGE]) (Wang et al. 2009) in Genomen durchgeführt werden (Genome Editing), nicht als Veränderung des genetischem Materials im Sinne der bestehenden Regulierungen gelten. Entsprechend veränderte Organismen würden daher nicht als GVO gelten. Hierunter könnten alle induzierten genetischen Veränderungen fallen, die weniger als 20 Nukleotidpaare

betreffen: In Stellungnahmen zu neuen Pflanzenzüchtungsverfahren hatten die von der EU eingesetzte NTWG (Buhk 2014; Lusser et al. 2011) und daran anschließend die ZKBS (2012b) die Auffassung vertreten, dass ein Segment mindestens 20 Nukleotidpaare (NP) umfassen muss, um als Resultat einer genetischen Modifikationstechnik identifiziert werden zu können. Eine absichtliche Änderung von weniger als 20 Nukleotidpaaren könne von dem zufälligen Vorkommen dieser Sequenz in großen Genomen (wie beispielsweise in vielen Pflanzen oder Säugetieren) nicht hinreichend sicher unterschieden werden. Sie sei nicht von den durch konventionelle Mutagenese oder natürliche Mutation entstandenen genetischen Veränderungen (zufälliges Vorkommen) zu unterscheiden (Lusser et al. 2011; ZKBS 2012b). Die durch Mutageneseverfahren induzierten Mutationen gelten gemäß Anhang 1 B der Richtlinie 2001/18/EG and Anhang II Teil A Nr. 1 der Richtlinie 2009/41/EG bzw. § 3 Nr. 3b des GenTG nicht als gentechnische Veränderungen. Insbesondere auf CRISPR/Cas, TALEN oder auf Oligonukleotiden basierende Verfahren (wie MAGE) bieten zunehmend die Möglichkeit, schnell und z. T. gleichzeitig mehrere kleine Veränderungen an unterschiedlichen Stellen des Genoms einzubringen (z. B. Cong et al. 2013; González et a.l 2014; Jakociunas et al. 2015; Rovner et al. 2015; Wang et al. 2009). Diese könnten in ihrer Summe zur Herstellung von Organismen mit komplexen neuen Funktionen führen und möglicherweise trotzdem nicht unter die Richtlinien und Gesetze für GVO fallen. Dass eine Revision der Gentechnikgesetzgebung angesichts dieser in den letzten Jahren entwickelten Verfahren dringend angeraten ist, wurde im Frühjahr 2015 sowohl von gentechnikkritischer Seite (Then 2015) als auch von einer Arbeitsgruppe der Leopoldina, der acatech und der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Leopoldina et al. 2015) konstatiert.

#### VERSAGEN DER ETABLIERTEN RISIKOBEWERTUNGSVERFAHREN AUF DER GRUNDLAGE VON ÄHNLICHKEIT UND VERTRAUTHEIT

Als Resultat der verschiedenen Synbio-Technologien (Kap. II.2) werden zunehmend genetisch modifizierte Organismen produziert werden, die immer weniger Ähnlichkeiten zu existierenden, bekannten Organismen aufweisen (Pauwels et al. 2013, S. 224; SCHER et al. 2014b, S. 5). Die große Zahl von veränderten und/oder neuen Teilen würde zudem die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von sogenannten emergierenden Eigenschaften – d. h. zunächst unbekannte Eigenschaften, die nicht einzelnen, bestimmten Teilen zuschreibbar sind, sondern die durch Zusammenwirken der Teile »neu« entstehen – erhöhen. Es wird seit längerer Zeit in praktisch allen Stellungnahmen zur Synbio darauf hingewiesen, dass es dadurch über kurz oder lang unmöglich wird, passende Vergleichsorganismen (»comparator organisms«) mit ähnlichen, bekannten Eigenschaften zu identifizieren, die bislang die Basis der Risikoabschätzung von GVO (nicht nur in der EU, sondern weltweit) dargestellt haben (»comparative analysis«; Kasten IV.1 u. IV.2).

#### KASTEN IV.1: DIE KONZEPTE DER SUBSTANZIELLEN ÄQUIVALENZ UND DER VERTRAUTHEIT

Die Konzepte der substanziellen Äquivalenz und der Vertrautheit (»familiarity«) bilden die Basis der vergleichenden Risikoabschätzung transgener Pflanzen (und Tiere). Das Prinzip besteht darin nachzuweisen, dass sich der gentechnisch veränderte Organismus nur in bestimmten, eingrenz- und untersuchbaren Eigenschaften von dem Ausgangsorganismus unterscheidet – ansonsten aber vergleichbar erscheint. Die Feststellung der substanziellen Äquivalenz alleine genügt aber nicht, sondern hinzukommen muss eine zweite Einschätzung: dass der Ausgangsorga-

nismus ausreichend bekannt ist und als sicher gelten kann. Diese Vertrautheit ist bei (traditionellen) landwirtschaftlichen Nutzpflanzen naturgemäß gegeben, allerdings können die bekannten Eigenschaften auch auf ein mögliches Risiko hinweisen. Beispielsweise besitzt Raps (anders als Mais) in Teilen Europas wilde verwandte Kreuzungspartner, außerdem hat er eine ausgeprägte Neigung, sich auch außerhalb landwirtschaftlicher Nutzflächen zu verbreiten. Wenn die Risikobewertung zu dem Schluss kommt, dass eine unkontrollierte Verbreitung der gentechnisch veränderten Merkmale vermieden werden soll, dann wird ein Anbau entsprechender Rapssorten trotz substanzieller Äquivalenz gerade aufgrund der Vertrautheit untersagt werden.

Bei Mikroorganismen sind sowohl substanzielle Äquivalenz als auch Vertrautheit im Hinblick auf eine offene Anwendung (in der Landwirtschaft oder bei der Bodensanierung) nicht in vergleichbarem Maß wie bei Nutzpflanzen gegeben. Nur in Ausnahmefällen werden Reinkulturen z. B. von Bakterien (wie Bacillus thuringiensis als Pflanzenschutzmittel im Ökolandbau) verwendet, üblicherweise handelt es sich um Mischkulturen verschiedener Arten, deren Zusammensetzung und damit ihre Eigenschaften nicht im Detail bekannt sind. Darüber hinaus zeichnen sich Mikroorganismen durch eine ausgeprägte Neigung zur Aufnahme/Weitergabe genetischen Materials aus (Bakterienkompetenz) und sind in Verbindung mit sehr kurzen Generationsdauern ständigen und schnellen Veränderungs- und Anpassungsprozessen unterworfen. All dies hat dazu geführt, dass bislang kaum Freisetzungen von gentechnisch veränderten Mikroorganismen stattgefunden haben und stattdessen in geschlossenen Systemen sogenannte Sicherheitsstämme verwendet werden, die als gesundheitlich unbedenklich gelten und ohne die speziellen Kulturbedingungen nach menschlichem Ermessen nicht überlebensfähig sind. Der Einsatz von synthetisch veränderten Mikroorganismen außerhalb geschlossener Systeme würde daher eine multidimensionale Veränderung der »biologischen Sicherheitslage« darstellen.

Quelle: TAB 2000 u. 2005

### INFRAGESTELLUNG DER EINZELFALLPRÜFUNG IM STUFENVERFAHREN

Hinzu kommt die Befürchtung, dass ein weiteres Grundprinzip der Risikoanalyse – die Einzelfallprüfung – aufgrund der quantitativen Zunahme von genetischen Modifikationen und GVO an seine Grenzen gelangen könnte. Die zuvor genannten neuen Methoden zum schnellen und gleichzeitigen Einbringen mehrerer genetischer Modifikationen in Organismen sowie zur parallelen Herstellung vieler Organismen mit unterschiedlich modifizierten Genomen könnten schon bald die (personellen und/oder finanziellen) Kapazitäten von Risikobewertungseinrichtungen überfordern. Sowohl die Einzelfallprüfung (»case-by-case«) als auch die schrittweise Bewertung in mehreren aufeinanderfolgenden Versuchen (»step-by-step«) (Kasten IV.2) könnten somit aus praktischen Gründen infrage gestellt werden (Pauwels et al. 2013, S. 224; SCHER et al. 2014b, S. 45).

### KASTEN IV.2: GRUNDPRINZIPIEN DER RISIKOBEWERTUNG VON GVO NACH EU-RECHT

> *Case-by-case*: Grundsätzlich wird für jeden Einzelfall auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse, plausibler Annahmen und Szenarien eine Risikoabschätzung durchgeführt, d. h. für jede konkrete gentechnische Veränderung in jedem einzelnen Organismus, z. B. in einer bestimmten Pflanzensorte oder einem mikrobiellen Produktionsstamm. Jede Übertragung z. B. durch Weiterkreuzung mit anderen Pflanzensorten erfordert eine Neubewertung.

> *Step-by-step*: Erfahrungen mit dem jeweiligen GVO sollen schrittweise gewonnen werden. Dabei werden in aufeinanderfolgenden Versuchen (Gewächshaus, Freisetzung in kleinem Maßstab, Freisetzung in großem Maßstab, Inverkehrbringen) die Sicherheitsauflagen, die zunächst ein Ausbringen des GVO in die Umwelt verhindern (geschlossenes System) bzw. räumlich und zeitlich begrenzen sollen (Freisetzungsversuche), verringert. Der jeweilige Schritt kann dann getan werden, wenn der vorherige gezeigt hat, dass er keine unvertretbaren Risiken für Mensch und Umwelt birgt.

> *Comparative Analysis*: Die bisherige Risikobewertung basiert zentral auf einem Vergleich mit nicht gentechnisch veränderten Organismen, z. B. konventionell gezüchteten Pflanzensorten oder bereits genutzten mikrobiellen Produktionsstämmen, deren Sicherheit aufgrund langjähriger Verwendung als gegeben angenommen werden kann. Anstatt eine Komplettcharakterisierung des GVO und seiner möglichen Umwelt- und Gesundheitsrisiken vorzunehmen, kann durch Anwendung der Konzepte der substanziellen Äquivalenz und der Vertrautheit (Kasten IV.1) die Zahl der zu prüfenden Risikoparameter und -annahmen auf ein handhabbares Maß reduziert werden.

Allerdings gehen die Einschätzungen über den Umfang der notwendigen Untersuchungen (u. a. zum Ausbreitungsverhalten, zu möglichen Wechselwirkungen mit anderen Organismen), die Bewertung der Ergebnisse und die Ableitung von notwendigen Risikomanagementmaßnahmen in Abhängigkeit von der Perspektive der beteiligten Experten oder Interessengruppen zum Teil massiv auseinander. Dies hat die Zulassung von GVO in der Vergangenheit in der Europäischen Union u. a. im Vergleich zu den USA stark begrenzt.

Quelle: Pauwels et al. 2013, S. 216; TAB 2000 u. 2005

**VORLIEGENDE VORSCHLÄGE ZUR ANPASSUNG DER RISIKOBEWERTUNGSVERFAHREN**

Im Vergleich zum bisherigen Vorgehen ergeben sich also zwei zentrale Fragenkomplexe: zum einen, wie eine *komparativ-qualitative* Risikobewertung angesichts von genetisch modifizierten Organismen, die sich immer weiter von natürlichen Organismen entfernen, weiter aufrechterhalten werden kann bzw. wann sie durch eine *quantitative Risikoabschätzung* ersetzt werden muss und wie das geschehen kann. Und zum anderen, wie bzw. ob eine potenziell ungeahnt große Zahl von GVO, die durch beschleunigende Technologien in kürzester Zeit möglich werden könnte, aufgrund begrenzter Kapazitäten allein der Regulierungsbehörden noch mit einer spezifischen, fallbezogenen und stufenweisen Risikobewertung vereinbar sein wird. Das bereits heute zentrale Problem bzw. der fundamentale Streitpunkt, wie viel Wissen über die Eigenschaften und das Verhalten von genetisch modifizierten Organismen vor einer Freilanderprobung und dann kommerziellen Nutzung realistischerweise erlangt und wie eine gesellschaftliche und politische Risikobewertung durchgeführt werden kann, die von einem Großteil der gesellschaftlichen Akteure akzeptiert wird, dürfte sich dadurch noch einmal stark verschärfen.

In Bezug auf beide Fragenkomplexe könnten bioinformatische Modellierungen sowie »omicsbasierte«[26] Testungen der intrazellulären, der gesamtorganismischen oder gar der ökosystemaren Wechselwirkungen notwendige Daten liefern. Um diese Daten generieren zu können, wird die Förderung der umfassenden funktionellen Charakterisierung aller relevanten biologischen Komponenten, der detaillierten Analyse der Physiologie von SVO unter verschiedenen Umweltbedingungen und ihrer Interaktion mit bestimmten Umgebungen sowie die Weiterentwicklung von computerbasierten Untersuchungsansätzen für notwendig erachtet (Pauwels et al. 2013, S. 221; SCHER et al. 2014b, S. 6 u. S. 25). Des Weiteren wurde die Heranziehung von als sicher bewerteten GVO mit bekannten Eigenschaften als zukünftige Vergleichsorganismen vorgeschlagen, um das Problem des wachsenden »genetischen Abstandes« von SVO zu natürlichen Vergleichsorganismen zu verringern (SCHER et al. 2014b, S. 27). Und mit Blick auf eine mögliche Beschleunigung von Risikobewertungsverfahrenen wurde in der Stellungnahme (II) der Scientific Committees auf die Möglichkeit hingewiesen, Gruppen von genetischen Modifikationen zu identifizieren, die – unter sogfältiger Berücksichtigung ihrer Wechselwirkungen – gemeinsam beurteilt werden und so individuelle Risikoabschätzungen (»case-by-case«) von Organismen teilweise ersetzen könnten (SCHER et al. 2014b, S. 36).

Insgesamt gehen all diese Vorschläge in Richtung einer zukünftig dominierenden Risikoabschätzung auf der Basis digitaler Modellierung – was konzeptionell fraglos zur inhärenten Logik der informationsgetriebenen, geplanten Gestaltung synthetisch-biologischer Organismen passt. Ob und wann solche hypothetischen Modellierungen aber tatsächlich eine hinreichende Datenbasis für eine belastbare Risikobewertung als Grundlage einer Zulassungsentscheidung liefern können, ist offen und liegt nur zum Teil an der wissenschaftlich-technischen Entwicklung. Mindestens genauso wichtig wird die weitere Entwicklung der mit der Regulierung von GVO bzw. zukünftig SVO verbundenen gesellschaftlich-normativen und politischen Debatte werden.

In der näheren Zukunft ist wohl davon auszugehen, dass die technischen Möglichkeiten, neuartige Organismen herzustellen, schneller zunehmen werden als das nötige umfassende Wissen über deren Eigenschaften und mögliche Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung. Angesichts der ablehnenden Haltung weiter Teile der Gesellschaft in Hinblick auf die Freisetzung von GVO kann derzeit kaum davon ausgegangen werden, dass eine deutliche Erhöhung der Unsicherheit bzw. des Nichtwissens bei der prospektiven Risikobewertung (zumindest in den meisten europäischen Ländern) akzeptiert werden würde (Näheres hierzu in den Kap. IV.1.4 sowie VII.2.1).

## Regelungslücken für GVO in den USA – Anlass für Forderungen nach (vorausschauender) Anpassung 1.3

Während also die Biosicherheitsgremien in Europa keinen aktuellen Regulierungsbedarf sehen, hat sich in den USA seit Frühsommer 2013 eine lebhafte Debatte über Regelungslücken für GVO entwickelt. Der Auslöser war ein wissenschaftlich-technisch in keiner Weise neuartiges Vorhaben, das deshalb in dieser Hinsicht noch nicht einmal zur Synbio i. w. S. gezählt werden kann. Durch die

26 Mit »Omics« wird die Erfassung der gesamten Molekülvariabilität verschiedener biochemischer Zellkomponenten bezeichnet, darunter Gene/DNA (Genomics), Boten-RNA-Moleküle (Transcriptomics), Proteine (Proteomics), Kohlenhydrate (Glycomics), sowie deren Funktionen und Netzwerke, die sie untereinander bzw. miteinander bilden, wie z. B. Stoffwechselwege (»metabolomics«).

beteiligten Akteure, die Finanzierung, die Motive und eben die zutage getretenen Regulierungslücken ist das Vorhaben für die Betrachtung der Perspektiven der Synbio aber von kaum zu überschätzender Bedeutung: Das sogenannte Glowing-Plant-Projekt, das im April 2013 auf der Crowdfundingplattform »Kickstarter.com« annonciert wurde und nicht nur große mediale Beachtung (Karberg 2013b), sondern auch heftige Reaktionen bei den gentechnikkritischen NRO ETC Group und Friends of the Earth (2013) hervorrief. Ziel des Projekts war (und ist es), durch die Übertragung von Genen aus leuchtenden (biolumineszenten) Bakterien in einem angemeldeten DIY-Labor in den USA selbstleuchtende Zierpflanzen zu erzeugen und deren Samen dann an die Crowdfunder weltweit zu verschicken. Die Aussendung von den USA aus fällt – anders als im Fall der gentechnisch veränderten Insekten von Oxitec (Kap. III.3.3) – nicht unter die Bestimmungen des Cartagena-Protokolls, weil die USA dieses genauso wie die zugrundeliegende Biodiversitätskonvention nicht unterzeichnet haben.

Es war aber weder das eigentliche Vorhaben bzw. Projekt, von dem nach Stand des Wissens keine (biologische) Gefahr ausgeht, noch die Frage nach der möglichen Verletzung des Cartagena-Protokolls, die bei den Regulierungsbehörden sowie in der etablierten Wissenschaft für Aufsehen sorgten – sondern die Feststellung, dass für das angezielte Produkt in den USA keine Aufsichtsbehörde zuständig war und dass dies keinen Einzelfall darstellte (Ledford 2013). Anders als in Europa gibt es in den USA keine sogenannte horizontale Regulierung der (Grünen) Gentechnik, die grundsätzlich bei einem gentechnischen Verfahren greift, sondern in Abhängigkeit von den Methoden und Produkten sind entweder Landwirtschafts-, Umwelt- oder Gesundheitsbehörden mit der Zulassung und Sicherheitsbewertung von GVO befasst. Die zugrundeliegenden Regeln wurden in den 1980er Jahren konzipiert und beschlossen (Carter et al. 2014, S. 13 ff.). Viele gentechnische Verfahren wurden aber erst danach zur Anwendungsreife entwickelt, ohne dass der Rechtsrahmen entsprechend angepasst worden wäre. Hierdurch tat sich insbesondere bei GVP eine Reihe von Lücken auf, die wenig beachtet, aber von einigen Akteuren anscheinend systematisch genutzt wurde. Insbesondere erfordert eine Genübertragung durch Partikelbeschuss mithilfe sogenannter »Gene Guns« (welche auch beim Glowing-Plant-Projekt genutzt wurde), anders als diejenige mithilfe von Agrobakterien, nicht automatisch eine Zulassung. Camacho et al. (2014) hatten festgestellt, dass die Zahl der gentechnisch veränderten Pflanzen, die beim zuständigen Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS) des U.S. Department of Agriculture (USDA) angemeldet wurden, aber aufgrund der Regulierungslücken keine Zulassung benötigten, seit 2010 in die Höhe geschnellt ist. Auffällig ist, dass diese GVP ganz überwiegend von kleineren Unternehmen oder öffentlichen Forschungseinrichtungen entwickelt worden sind, die sicher Schwierigkeiten gehabt hätten, den kostenintensiven Zulassungsprozess zu finanzieren, und deshalb vermutlich gezielt auf diese Vermeidungsstrategie gesetzt haben. Camacho et al. (2014, S. 1091) sahen es zwar als positiv an, dass hierdurch das Spektrum der FuE-Ansätze und Produktideen verbreitert werden konnte, betonten aber, dass diese Form der unterschiedlichen Behandlung nicht im Sinn eines ausgewogenen Regulierungsrahmens für GVP sein dürfte.

Gezielt mit Blick auf die Regulierungsdebatte der Synbio wurde vom US-amerikanischen J. Craig Venter Institute im Mai 2014 ein programmatischer Bericht vorgelegt (Carter et al. 2014). Darin untersuchten die Autoren, inwiefern das US-Regulierungssystem auf die Freisetzung von SVO vorbereitet ist, und kamen zu dem Schluss, dass zwei Entwicklungen eine Revision der Risikoregulierung von GVO in den USA dringend notwendig machen (Carter et al. 2014, S. 4 f.):

> zum einen die Zunahme der GVO-Herstellungsverfahren, die aufgrund der geschilderten Regelungslücken keine Zulassungsnotwendigkeit erfordern und deren Zahl durch die vielen Methoden der Synbio weiter ansteigen wird.
> Zum anderen wiesen sie darauf hin, dass durch die Synbio die Zahl der kommerziell nutzbaren gentechnisch veränderten Mikroorganismen grundsätzlich sowie insbesondere für offene Anwendungen stark erhöht werden wird, was die Prüfkapazitäten der Environmental Protection Agency (EPA) überfordern wird. Doch nicht nur die Zahl der nötigen Risikobewertungen wird steigen, sondern auch deren Schwierigkeit, weil die SVO zunehmend komplex, d. h. umfassender verändert werden.

Einzelheiten zu den von Carter et al. (2014) formulierten Handlungsoptionen müssen aufgrund der Unterschiede zur europäischen bzw. deutschen Regelungssituation hier nicht referiert werden. Angesichts der internationalen Dimension der Synbio-Debatte ist es aber erwähnenswert, dass von Carter et al. einerseits für eine breitere, systematischere Erfassung der Gentechnik- und Synbio-Anwendungen plädiert wird (einschließlich einer Stärkung der Kapazitäten für Risikoabschätzung und -bewertung) und andererseits für eine gezielte Deregulierung der Freisetzung von bestimmten Niedrigrisikomikroorganismen bzw. für vereinfachte Sicherheitsüberprüfungen in diesen Fällen. Letzteres ist für Europa derzeit kaum vorstellbar, aber aufgrund der Bedeutung der USA sowie z. B. auch von südamerikanischen Ländern, die sich in ihrer Biosicherheitspolitik teils stark an den USA orientieren (TAB 2009, S. 67 ff.), für die Zukunft der globalen Synbio-Regulierung durchaus mit zu bedenken. Darüber hinaus könnte die Forderung nach einer einfacheren Zulassung von risikoarmen Gentechnikanwendungen bzw. -forschungsvorhaben auch hierzulande z. B. über eine Stärkung der DIY-Bewegung an Bedeutung gewinnen (Kap. VI.6).

## Eine Forschungsagenda für substanziell veränderte, nichtvertraute (Mikro-)Organismen 1.4

Auch wenn noch keine konkreten Anträge auf die Zulassung von Freisetzungsversuchen oder gar die Marktzulassung von mithilfe der Synbio veränderten Mikroorganismen (SVMO) bekannt sind oder bald erwartet werden, haben sich sowohl in den USA als auch in der EU, insbesondere im Vereinigten Königreich, wichtige Forschungseinrichtungen und -organisationen in den vergangenen Jahren mit Sicherheitsfragen bzw. den Möglichkeiten der Risikoabschätzung befasst.

In den USA führte das WWICS (2011) nach dem Bericht der Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues (PCSBI 2010a) im Sommer 2011 einen ersten Workshop zur Umweltbewertung von SVMO durch. Dabei wurde deutlich, wie wenig über das Verhalten veränderter Mikroorganismen in der Umwelt bekannt ist, weshalb umfassende, langjährige Forschungsprogramme für nötig erachtet wurden. Dana et al. (2012) nannten ein Minimum von 20 bis 30 Mio. US-Dollar über einen Zeitraum von zehn Jahren für notwendig, um vier prioritäre Bereiche zu untersuchen:

1. die detaillierte molekulare Charakterisierung der veränderten Mikroorganismen, u. a. hinsichtlich möglicher toxischer Substanzen;
2. die Überlebens- und Konkurrenzfähigkeit sowie das Verhalten in möglichen aufnehmenden Ökosystemen;
3. die (genetische) Anpassungsfähigkeit der Mikroorganismen selbst;
4. der horizontale Gentransfer auf andere (Mikro-)Organismen.

Ein Workshop des CSynBI im April 2013 befasste sich ausführlicher mit der Datenlage und den absehbaren Herausforderungen bei der Nutzung von SVMO in offenen und geschlossenen Systemen (Marris/Jefferson 2013a u. 2013b). Dabei wurde deutlich, dass (wie in Kasten IV.2 erwähnt und anders als bei GVP) nur ganz wenige Erfahrungen mit der Freisetzung von gentechnisch veränderten Mikroorganismen vorliegen. Nachdem 44 (nichtmedizinische) experimentelle Freisetzungsversuche von gentechnisch veränderten Mikroorganismen in der gesamten EU zwischen 1991 und 2000 bewilligt worden waren, wurden bis 2007 lediglich drei weitere Freisetzungen genehmigt und seitdem keine mehr (Marris/Jefferson 2013a, S. 11). In den USA lagen die Zahlen sogar noch niedriger (26 von 1998 bis 2007, danach keine mehr).

Als Ursache für das offensichtliche Aufgeben von entsprechenden Forschungsvorhaben wurden von den beteiligten Experten zwei Hauptgründe angeführt (Marris/Jefferson 2013a, S. 12): Auf der einen Seite die Nichterfüllung der Erwartungen an die Konkurrenz- und Leistungsfähigkeit der gentechnisch veränderten Mikroorganismen bzw. die Überlegenheit natürlicher Mikroorganismen, auf der anderen Seite regulatorische Hürden sowie die negative öffentliche Haltung gegenüber GVO (für nichtmedizinische Anwendungen im Freilandeinsatz).

Die Frage der Überlebens- und Konkurrenzfähigkeit (in einer natürlichen Umgebung) ist auch mit Blick auf künftige SVMO von zentraler Bedeutung. Einerseits sollen die veränderten Mikroorganismen ihre vorgesehen Funktion (beispielsweise als Biosensor oder bei der Biosanierung; Kap. III.4) möglichst effizient und effektiv erfüllen, andererseits sollen sie das jeweilige Ökosystem nicht in unerwünschter bzw. überhaupt unkontrollierter Art und Weise beeinflussen (Marris/Jefferson 2013b, S. 3). Ob und wann die Synbio die Forschenden tatsächlich in die Lage versetzen wird, die Effekte der SVMO verlässlich vorhersagen zu können, darüber gingen die Meinungen (wenig überraschend) weit auseinander (Marris/Jefferson 2013a, S. 13).

Hinsichtlich eines zukünftigen Risikomanagements wurde eine große Übereinstimmung unter den beteiligten Fachleuten festgestellt, dass bei Mikroorganismen gegenwärtig angewendete Verfahren für ein sogenanntes Biocontainment, also eine gezielte genetische Veränderung als »eingebaute« Sicherheitsmaßnahme, keinen verlässlichen, d. h. dauerhaften und (nahezu) 100 %igen Schutz gegen die Weitergabe der neu eingebrachten oder neukombinierten Eigenschaften bieten kann (Marris/Jefferson 2013a, S. 22 ff.; vgl. auch Moe-Behrens et al. 2013, S. 4 f.; SCHER et al. 2014b, S. 38). Dies gilt grundsätzlich auch bei höheren Pflanzen (TAB 2005, S. 220), allerdings zeichnen sich Mikroorganismen darüber hinaus noch explizit durch eine ausgeprägte Neigung zur Aufnahme/Weitergabe genetischen Materials (Bakterienkompetenz) sowie hohe Veränderungsraten und Anpassungsfähigkeiten aus. Wenn ein Gentransfer auf jeden Fall vermieden werden soll, kommt eine offene Anwendung unter Verwendung der bisherigen Biocontainmenttechniken daher prinzipiell nicht infrage.

Doch auch die vermeintlich geschlossenen Produktionsanlagen in Forschung und Industrie können nach Ansicht einiger Workshopteilnehmer keine 100 %ige Sicherheit gegen das Entweichen von veränderten Mikroorganismen bieten. Hingewiesen wurde dabei auf die schwache Datenlage, weil geschlossene Anlagen kaum untersucht würden (Marris/Jefferson 2013a, S. 21 f.): Fehlende Hinweise auf negative Wirkungen seien nicht zu verwechseln mit dem Nachweis, dass tatsächlich keine negativen Wirkungen aufgetreten seien. All dies spricht nicht notwendigerweise gegen eine Nutzung von SVMO – ob in geschlossenen, offenen oder halboffenen Anlagen –, aber für eine wirklich gründliche, prospektive Befassung mit Sicherheits- und Risikoaspekten.

Vor diesem Hintergrund und den Problemen bisheriger Gentechnikansätze für ein effektives und verlässliches Biocontainment wurde von der o. g. Expertengruppe der drei wissenschaftlichen Komitees der EU-Kommission in ihrer vorläufigen Stellungnahme (SCHER et al. 2014b) die Entwicklung neuer Biocontainmentformen empfohlen. Diese sollen auf sogenannten orthogonalen Systemen, die veränderte genetische Codes und/oder nichtnatürliche Komponenten (wie XNA-Varianten oder modifizierte Aminosäuren) beinhalten, aufbauen (SCHER et al. 2014b, S. 41 u. 47). Neue Laborexperimente mit genetisch umkodierten (»genetically recoded«) Bakterien (Dolgin 2015; Mandell et al. 2015; Rovner et al. 2015) lassen solche Systeme, die sowohl eine unkontrollierte Ausbreitung von SVMO als auch einen (funktionellen) Genaustausch mit natürlichen Organismen unmöglich machen würden, prinzipiell möglich erscheinen.

Das WWICS veröffentlichte gemeinsam mit dem MIT (nach zwei Workshops im Auftrag der US-amerikanischen National Science Foundation [NSF]) eine weiter ausgearbeitete Forschungsagenda zu den möglichen ökologischen Folgen von SVO (Drinkwater et al. 2014). Es sei dringend notwendig, Wissenslücken zu schließen, weil die ökonomisch sinnvolle Nutzung z. B. von Synbio-Anwendungen wie Biokraftstoffe aus Algen voraussichtlich die Freisetzung der Organismen in sehr großem Maßstab erfordere. Als sieben prioritäre Forschungsbereiche wurden (in Frageform) genannt (Drinkwater et al. 2014, S. 5):

- *Vergleichsorganismen* (»comparators«): Wie kann eine Risikoabschätzung durchgeführt werden, wenn es keine Vergleichsorganismen gibt?
- *Phänotypische Charakterisierung*: Wie können bedenkliche Eigenschaften von SVO identifiziert werden? Welche sind kurz-, welche sind langfristig relevant?
- *Fitness, genetische Stabilität, horizontaler Gentransfer*: Wie können diese für die Interaktion mit der Umwelt entscheidenden Parameter verlässlich und prospektiv bei neuartigen Organismen bestimmt werden?
- *Möglichkeiten des biologischen und physikalischen Containments*: Welche Anforderungen sind daran zu stellen? Welche Freisetzungen sind als irreversibel anzusehen?
- *Monitoring und Kontrolle*: Wie können SVO mit welchem Aufwand, mit welchen Methoden und welcher Verlässlichkeit im Freiland überwacht werden? Wer ist zuständig, wer hat Datenzugang?
- *Modellierung*: Wo liegen (zukünftige) Potenziale und Grenzen einer theoretischen Abschätzung des Verhaltens von SVO in der Umwelt?
- *Standardisierung von Methoden und Daten*: Welche Test- und Datenerhebungsmethoden sollten für Risikoabschätzung und Monitoring entwickelt werden? Wer könnte entsprechende Standards etablieren?

Im November 2014 hat das österreichische Bundesministerium für Gesundheit eine Studie zum Stand der Synthetischen Biologie herausgegeben (Ribarits et al. 2014), in der auch die Themen Risikobewertung und Risikomanagement diskutiert wurden. Die Gesamteinschätzung bestätigte den hier beschriebenen Diskussionsstand – kein akuter regulatorischer Handlungsbedarf, aber Erfordernis der kontinuierlichen vorausschauenden Beobachtung und Analyse der wissenschaftlich-technologischen Entwicklung sowie entsprechender Forschungsvorhaben der Synbio. Betont wird die Notwendigkeit, die Risikoanalyse, aber auch die Risikoregulierung im Rahmen einer internationalen, möglichst weltweiten Abstimmung weiterzuentwickeln (Ribarits et al. 2014, S. 70).

## Fazit 1.5

Ein aktueller Bedarf in Richtung einer konkreten Überarbeitung der Risikoregulierung für GVO in Deutschland bzw. Europa (in Richtung SVO) war auf Basis der Wissenslage des TAB im Frühjahr 2015 nicht erkennbar. Aber angesichts der Dynamik der wissenschaftlich-technischen Entwicklung sowie der Regulierungsunterschiede in verschiedenen Weltregionen erscheint eine vorausschauende, intensivere Befassung mit der Risikoabschätzung und der Risiko-Nutzen-Bewertung einer Freisetzung »synthetisch« veränderter (Mikro-)Organismen durchaus angezeigt – ausgehend von der bisherigen Risikoforschung zu GVO, bei der Ausrichtung, Umfang, Finanzierung und Akteure zum Teil seit Jahren umstritten sind (Kap. VII.2.2).

Das zentrale Thema für die Risikoabschätzung und Risiko-Nutzen-Bewertung von zukünftigen SVO ist die Frage, wie eine Sicherheitsbewertung ohne substanzielle Äquivalenz zu einem vertrauten Ausgangsorganismus so durchgeführt werden müsste, dass das Ergebnis von Akteuren in Forschung, Industrie, Politik sowie von zivilgesellschaftlichen Organisationen und der Öffentlichkeit/Bürgern als Zulassungsgrundlage für eine Freilandanwendung akzeptiert werden könnte. Bei Pflanzen stellt sich diese Frage ab einem größeren gentechnischen »Umbau«, bei Mikroorganismen im Grunde bei jeder Art von Freilandeinsatz (beispielsweise bei einer Mikroalgenkultur zur Biokraftstoffproduktion), weil diese bislang fast ausschließlich in geschlossenen Systemen und nur in Einzelfällen bei medizinischen (Versuchs-)Anwendungen der Gentherapie und von Lebendimpfstoffen (Kap. III.3.1) sowie ganz wenigen bekannten, experimentellen (halb)offenen Anwendungen (u. a. der Umweltsensorik; Kap. III.4.1) zum Einsatz gekommen sind. Ein hochbrisantes Thema könnten außerdem Eingriffe in die menschliche Darm- und sonstige Mikroflora werden, die in jüngster Zeit vermehrt als künftiger Therapieansatz erforscht werden (Garber 2015; Sonnenburg 2015), weil hier die Regelungszuständigkeiten unklar sind: Das deutsche GenTG bezieht sich nicht auf die Anwendung der Gentechnik am Menschen und damit wohl nicht auf die Bestandteile des menschlichen Mikrobioms, solange sich diese im menschlichen Körper befinden (Kap. VI.4.4).

Einige Regulierungsbehörden haben die bevorstehende Problematik bei Pflanzen bereits erkannt und begonnen, darauf zu reagieren. Sowohl die EFSA (2011) als auch das Bundesamt für Naturschutz (BfN o. J.) haben zu den Strategien und Konzepten einer »Risikobewertung ohne Komparator« in den letzten Jahren Forschungsaufträge vergeben, die einen Ausgangspunkt für die weitere Bearbeitung bieten können (Kap. VII.2.2).

Ein weiteres Thema könnte die erneute Befassung mit den Sicherheitsanforderungen an Produktionsorganismen auch in geschlossenen Systemen (»contained use«) werden, insbesondere mit Blick auf mögliche »vollsynthetische«, weitgehend de novo konstruierte oder xenobiologisch massiv veränderte Organismen. Letztere werden von einigen Autoren als potenziell besonders sicher betrachtet (Marliere 2009; Schmidt 2010; Schmidt/Lorenzo 2012), weil sie aufgrund ihrer fundamentalen biochemischen Unterschiede für ihre Vermehrung und zum Überleben von der Bereitstellung nichtnatürlicher Substanzen abhängig sind sowie zu keinem funktionellen Genaustausch mit natürlichen Organismen fähig sein dürften. Auf der Basis neuer Forschungsergebnisse wurden Anfang 2015 xenobiologisch (stark) veränderte Organismen von prominenten Synbio-Forschern, darunter George Church, verstärkt zur Diskussion gestellt (Dolgin 2015; Malyshev et al. 2014; Mandell et al. 2015; Rovner et al. 2015; Thyer/Ellefson 2014). Dabei ist allerdings im Vorhinein unklar, ob diese (falls sie entweichen oder bewusst unter Freilandbedingungen angewendet würden) nicht doch mit natürlichen Organismen wechselwirken bzw. Ökosysteme beeinflussen könnten (Dolgin 2015;

Joyce 2012; König et al. 2013, S. 19)[27] – und es dürfte massiv umstritten sein, durch welche Methoden und Tests das Nichtwissen über das Verhalten dieser neuartigen Konstrukte reduziert werden kann und muss, um eine weithin akzeptable und sichere experimentelle oder kommerzielle Nutzung zu ermöglichen.

Schließlich könnte auch die Risikodebatte in Bezug auf *gentechnisch veränderte Insekten* (zur Bekämpfung der Krankheitsübertragung durch Stechmücken sowie von Pflanzenschädlingen; Kap. III.3.3) – obwohl es sich um recht begrenzte gentechnische Eingriffe handelt – in den kommenden Jahren an Bedeutung gewinnen. Erst seit Kurzem liegt eine Richtlinie der EFSA (2013) zur Risikobewertung von gentechnisch veränderten Fischen, Insekten, Säugetieren und Vögeln vor, nationale Umsetzungen sind bislang nicht bekannt (GeneWatch 2014). Einen Freisetzungsantrag für gentechnisch veränderte Olivenfliegen in Spanien zog Oxitec wieder zurück, um zunächst von den dortigen Behörden geforderte weitere Studien durchzuführen (transGEN 2015b). Über die Risikobewertung der Freisetzung gentechnisch veränderter Moskitos in den außereuropäischen Ländern Kaimaninseln, Malaysia, Brasilien und Panama ist wenig bekannt geworden (GeneWatch et al. 2012). Trotz kritischer Minderheitsmeinung erfolgte durch die brasilianische Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio) die Zulassung für eine kommerzielle Nutzung in Brasilien im April 2014. Die britische gentechnikkritische NRO GeneWatch (2014) bemängelte insbesondere die Missachtung der Informationsverpflichtungen, die sich für Oxitec aus dem Cartagena-Protokoll anlässlich der grenzüberschreitenden Verbringung der GVO ergeben haben. Insgesamt erscheint angesichts der Erfahrungen mit der Zulassung transgener Pflanzen eine konsensuale positive Risikobewertung gentechnischer Eingriffe in Tiere mit hohem Verbreitungspotenzial in der EU sehr unwahrscheinlich. Dies dürfte insbesondere für die in Kapitel III.3.3 beschriebenen Gene-Drive-Anwendungen zutreffen, die eine schnelle Ausbreitung bestimmter Gene (z. B. zur Unterdrückung von Krankheitsübertragungsmechanismen) in Wildpopulationen zum Ziel haben (Oye et al. 2014). Auch der Global Risk Report 2015 des World Economic Forum behandelt Gene-Drive-Anwendungen und deren Regulation als eine der mit der Synbio verbundenen »fundamentalen Herausforderungen« (WEF 2015).

In Verbindung mit den zunehmenden Möglichkeiten der Genome-Editing-Verfahren ergeben sich Szenarien für Anwendungen sowohl an Tieren als auch am Menschen, die im März 2015 von Wissenschaftlern als so besorgniserregend eingeschätzt wurden, dass ein globales Moratorium für menschliche Keimbahneingriffe vorgeschlagen wurde (Baltimore et al. 2015; Cyranowski 2015; Lanphier et al. 2015; Vogel 2015). Zwar wurde bislang der Begriff Synbio nur vereinzelt in diesen Zusammenhang gebracht (Then 2015), aber es liegt durchaus nahe, dass die zukünftige Risiko- und Regulierungsdebatte alle Technologien miteinbezieht, die im vorliegenden Bericht als Synbio i. w. S. bezeichnet werden (Kap. VII.1.1 u. VII.2.2).

## Biosecurity – Schutz vor Missbrauch 2.

Im Gegensatz zum Schutz vor möglichen unbeabsichtigten negativen Folgen für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt durch den Umgang mit oder die Freisetzung von (gentechnisch verän-

27 http://blogs.discovermagazine.com/notrocketscience/2012/04/19/synthetic-xna-molecules-can-evolve-and-store-genetic-information-just-like-dna/ (23.11.2015)

derten) Organismen (Biosafety) wird der Schutz vor bewusstem Missbrauch unter dem Begriff Biosecurity zusammengefasst. Neben der gezielten Entwicklung, Herstellung und Weitergabe von biologischen Waffen/Kampstoffen durch reguläre Militäreinrichtungen oder auch durch terroristische Organisationen gehören zu den Gefährdungsquellen auch kriminelle Aktivitäten, beispielsweise zu Herstellung von Drogen, Dopingsubstanzen oder Arzneimittelfälschungen. Über diese entweder geheim gehaltenen oder illegalen Aktivitäten ist es naturgemäß für eine Einrichtung wie das TAB, das ausschließlich mit öffentlich verfügbaren und nachvollziehbaren Informationen arbeitet, nicht möglich, konkrete Einblicke zu erlangen. Diese inhärent schlechte Informationslage führt dazu, dass eine detaillierte, faktenbezogene Debatte zur Abschätzung der Gefahren von Bioterror und Biocrime (als Folge von Synbio-Aktivitäten, aber auch sonst) eigentlich nicht geführt werden kann. Allerdings können grundsätzlich Fragen nach dem möglichen Missbrauch von Technologien, die sowohl zum gesellschaftlichen Wohl als auch bewusst für schädliche Zwecke genutzt werden können, sogenannte Dual-Use-Technologien, gestellt werden. Bei biologischen Technologien geht es dabei meist um zwei Ebenen: 1. das heikle Wissen als solches – z. B. zur Synthetisierung und Produktion toxischer Substanzen, hochpathogener Viren oder resistenter bakterieller Krankheitserreger – und 2. der Zugang zu diesem Wissen sowie zu den Technologien bzw. Apparaten (Laborausstattung), die für die Realisierung notwendig sind.

Mit der Synbio ist die Befürchtung verbunden, dass sich durch die beschleunigte Entwicklung bei 1. (dem Wissen) die Problematik bei 2. (Zugang zur Umsetzung/Anwendung) deutlich intensiviert. Die enge Kopplung an heutige und zukünftige Datenverarbeitungstechnologien, die häufig eine ausgelagerte Speicherung der Daten bedeuten (vgl. hierzu aktuell TAB 2014a), deren effektiver Schutz gegen Missbrauch als nicht gewährleistet angesehen werden muss, sowie die damit verbundenen zunehmend dezentralen Nutzungsmöglichkeiten schaffen sowohl quantitativ als auch qualitativ neue potenzielle Gefahren. Daher ist bereits seit einiger Zeit eine intensive Auseinandersetzung über angemessene Gegenmaßnahmen entstanden, die von strikter Zugangsregulierung und Überwachung bis zu Selbstverpflichtungen und Aufklärungskampagnen zur Bewusstseinsschaffung reichen.

## Potenziell für die Biosecurity relevante Techniken und Ansätze der synthetischen Biologie 2.1

Biosecurityfragen in Bezug auf biologische Forschung allgemein bzw. speziell zur Gentechnik und Synthetischen Biologie sind vor allem nach den Terroranschlägen vom 11. September 2001, den darauf folgenden Attentaten mit durch Anthraxsporen kontaminierten Briefen an US-Kongressabgeordnete sowie der Publikation von Arbeiten zur Veränderung von Viren und zur Synthese des Gesamtgenoms bzw. von großen Genomteilen von Viren verstärkt in den Blickpunkt gerückt (Epstein 2012).

Im Jahr 2001 wollten Forscher mit der Absicht, die Ausbreitung von Mäusen in Australien zu bekämpfen, einen auf dem Mäusepockenvirus basierenden »Verhütungsimpfstoff« verbessern, der Mäuse unfruchtbar macht. Dazu hatten sie das Gen für Interleukin 4 (ein körpereigenes Protein, das die sogenannte antikörpervermittelte Immunantwort verstärkt) in das Erbgut des Virus eingebracht. Unerwarteterweise resultierte daraus ein tödliches Virus, das Teile des Immunsystems lahm legte und selbst geimpfte Tiere tötete (Jackson/Ramshaw 2010; Jackson et al. 2001). Ein Jahr später wurde berichtet, dass das Poliovirus (Erreger der Kinderlähmung) über eine chemisch synthetisierte

DNA-Matrize und dem davon enzymatisch abgelesenen RNA-Genom des Virus im Reagenzglas mithilfe von Zellextrakten hergestellt worden war (Cello et al. 2002). Weitere Genomsyntheseansätze (»synthetic genomics«) (Wimmer/Paul 2011) erlaubten es u. a., das Virus der verheerenden Grippeepidemie von 1918 – anhand von Sequenzinformationen vom Erbgut des Virus, das aus Permafrostleichen aus dieser Zeit gewonnen wurde – wieder »auferstehen« zu lassen (Tumpey et al. 2005) sowie das SARS-Virus herzustellen (Becker et al. 2008). Alle diese Experimente wurden mit dem Ziel verfolgt, die Mechanismen der Pathogenität bzw. den Ursprung dieser Viren besser zu verstehen (Wimmer/Paul 2011).

Die fortschreitenden Möglichkeiten der DNA-Synthese und nachfolgendem Zusammenbau der DNA-Stücke zu ganzen Genomen (»Genomassemblierung«) erlauben es zudem, Viren im Zuge der Genomsynthese gezielt zu verändern. Dabei können auf einmal sehr viele Veränderungen in verschiedene Gene eingebracht werden. Solch ein gleichzeitiges Einbringen Hunderter von Veränderungen bei der Virusgenomsynthese wurde bereits in Experimenten mit Mäusen genutzt, um in kurzer Zeit abgeschwächte Viren für Lebendimpfstoffe herzustellen, z. B. gegen Grippe (Mueller et al. 2010).

Umgekehrt könnten durch das gleichzeitige Einführen von Mutationen in Virengenome auch neue Eigenschaften hervorgerufen werden. In diesem Zusammenhang haben in den vergangenen drei Jahren Arbeiten mit Vogelgrippeviren international starke Besorgnis und Diskussionen provoziert, insbesondere darüber, wie mit diesem Dual-Use-Wissen umgegangen bzw. unter welchen Umständen es veröffentlicht werden soll (Faden/Karron 2012); Kap. IV.2.3). Ausgangspunkt waren 2011 Arbeiten zweier Forschungsgruppen um Ron Fouchier sowie Yoshihiro Kawaoka (Herfst et al. 2012; Imai et al. 2012). Bei diesen Arbeiten wurden vier bzw. fünf Veränderungen einzelner Buchstaben im genetischen Code (Punktmutationen) in einem bzw. zwei Genen des für den Menschen oft tödlichen Vogelgrippevirus H5N1 (durch eher »klassische« Mutagenese, Selektion und gentechnische Arbeiten) identifiziert und entsprechende Viren hergestellt, die durch Tröpfcheninfektion – d. h. durch die Luft, ähnlich einer normalen saisonalen Grippe – von Mensch zu Mensch übertragbar sein könnten. (Bislang ist bei Vogelgrippeviren eine Übertragbarkeit von Mensch zu Mensch durch Tröpfcheninfektion zum Glück nicht aufgetreten, wodurch die Auswirkungen von H5N1 bei Menschen in der Vergangenheit begrenzt geblieben sind).

Im Rahmen einer der Arbeiten (Imai et al. 2012) wurde so ein künstlich rekombiniertes Virus aus dem pandemischen (normalen) Grippevirus von 2009 (pH1N1) hergestellt, das ein mutiertes Hämagglutiningen aus einem H5N1-Vogelgrippevirus enthielt. Dieses Gen kodiert ein Protein, welches wichtig für die Anheftung des Virus an Wirtszellen ist. In der zweiten Arbeit wurden entsprechende Mutationen direkt in ein H5N1-Vogelgrippevirus eingebracht (Herfst et al. 2012). In beiden Fällen konnten nach der Infektion von Frettchen, den bevorzugten Modelltieren für die Übertragung von Grippeviren, Virennachkommen (mit nur einer zusätzlich erworbenen Mutation) isoliert werden, die zwischen den Tieren durch Tröpfcheninfektion übertragen werden konnten, die Tiere aber nicht töteten. Auch ist zu berücksichtigen, dass, obwohl das Frettchen als das beste Modell für die Infektions- und Übertragungswege von Grippeviren für den Menschen gilt, verlässliche Voraussagen aus den beiden H5N1-Arbeiten bezüglich der tatsächlichen Übertragungseffizienz und Letalität der so veränderten Viren beim Menschen kaum möglich erscheinen (Cohen 2012). Zwei der in den Experimenten identifizierten, notwendigen Mutationen wurden bereits gemeinsam in aus Menschen isolierten Vogelgrippeviren gefunden, und eine Studie legt nahe, dass ein Virus die restlichen notwendigen Mutationen innerhalb eines einzigen Säugetierwirts entwickeln könnte (Russell et al. 2012).

Dies lässt die natürliche Entstehung eines solchen potenziell hochgefährlichen Virus als durchaus realistisch erscheinen (Russell et al. 2012) und könnte so auch Wissen über solche Mutationen und für deren gezieltes Monitoring Bedeutung verleihen. Die Durchführung ähnlicher Experimente zur Herstellung von Viren mit neuen Eigenschaften (sogenannte Gain-of-Function-Experimente), wurde im Jahr 2013 von den beiden genannten Forschergruppen – in einem kontrovers diskutierten Brief (Malakoff 2013) an die Wissenschaftszeitschriften »Science« und »Nature« – auch für das Anfang 2013 in China aufgetretene H7N9-Vogelgrippevirus gefordert (Fouchier et al. 2013c u. 2013d). Schließlich erschienen im ersten Halbjahr 2014 drei weitere, umstrittene Publikationen über Experimente, bei denen pathogene Vogelgrippeviren durch Selektion und/oder gezielte Veränderungen im Erbgut hergestellt wurden, die bei Frettchen durch Tröpfcheninfektion übertragbar waren (Linster et al. 2014; Sutton et al. 2014; Watanabe et al. 2014), darunter ein Virus mit Ähnlichkeiten zum (verheerenden) Grippevirus von 1918 (Watanabe et al. 2014).

Insgesamt wird die Einführung multipler Genveränderungen/-mutationen, die zu neuen Eigenschaften (wie im Falle des H5N1-Vogelgrippevirus) führen können, durch die Möglichkeiten der DNA-Synthese stark erleichtert, da keine aufwendigen Methoden für die gerichtete Mutagenese und DNA-Klonierungstechniken mehr angewendet werden müssen. Darüber hinaus könnte das planmäßige Entwerfen von neuen Eigenschaften durch Kombination von vorhandenen biologischen Komponenten, basierend auf Wissen über diese Komponenten und deren Funktion in anderen Systemen, eine weitere Möglichkeit darstellen, Viren zu verändern. Experimente, bei denen auf diese Weise neue Funktionen in menschlichen Zellen konstruiert bzw. Viren mit Eigenschaften »ausgestattet« wurden, um Krebszellen zu erkennen und zu bekämpfen (Breitbach et al. 2011; Culler et al. 2010; Johnson et al. 2002; Xie et al. 2011), lassen diese Möglichkeit bereits jetzt bzw. in absehbarer Zeit als realistisch erscheinen.

Über Viren hinaus sollte es durch Metabolic-Engineering-Ansätze auch möglich sein, Stoffwechselwege in Bakterien oder Pilzen zu entwerfen und zu erzeugen (oder auch nur zu verändern), um auf diese Weise Toxine zu produzieren oder die Pathogenität der Organismen zu erhöhen – so, wie computerbasiertes Design von neuen Stoffwechselwegen bereits erfolgreich zur Herstellung von bestimmten Chemikalien und Biotreibstoffen in Bakterien verwendet worden ist (Bond-Watts et al. 2011; Yim et al. 2011; Kap. III.1 u. III.2.3). Die Synthese ganzer Bakteriengenome (Gibson et al. 2008) und die erstmalige, damit erfolgreich durchgeführte »Umprogrammierung« einer verwandten Bakterienzelle (Gibson et al. 2010) durch die Arbeitsgruppe von Craig Venter lassen erwarten, dass mittel- bis langfristig die Synthese computerdesignter ganzer Genome für gezielte, komplexe und multiple Veränderungen auch in Bakterien genutzt werden kann. Darüber hinaus könnten Methoden zur schnellen und extensiven Variierung von Genomen (Isaacs et al. 2011; Wang et al. 2009) über die Selektion für pathogene Eigenschaften (»directed evolution«) zur Herstellung neuer Pathogene genutzt werden. Diese könnten theoretisch auch gegen Nutztiere oder Nutzpflanzen gerichtet werden (Pamlin et al. 2015, S. 111).

Demgegenüber erscheint das gezielte Entwerfen und Herstellen von komplett neuen »synthetischen« Organismen aus einzelnen Bestandteilen (»from scratch«, Bottom-up-Ansätze; Kap. II.1) aufgrund der nach wie vor unzureichenden Wissensbasis auf absehbare Zeit nicht möglich zu sein, weshalb von diesen Ansätzen in der näheren Zukunft keine Biosecurityrisiken zu erwarten sind.

## Existierende Kontrollnormen und Verhaltenskodizes 2.2

Angesichts der zuvor umrissenen Experimente sowie der aufkommenden Möglichkeiten der DNA-Synthese und der Synthetischen Biologie wurden möglicher Missbrauch sowie Optionen, diesen zu verhindern, relativ früh thematisiert. Dies geschah sowohl aus dem Feld der Synbio-Forschenden heraus (Church 2004 u. 2005; Garfinkel et al. 2007) als auch von außerhalb – anfangs vor allem von mit der US-amerikanischen Regierung sowie der EU-Kommission assoziierten bzw. diese beratenden Gremien (NEST 2005; NRC 2004 u. 2006; NSABB 2006). Davon ausgehend entwickelten sich Diskussionen um Biosecurity und das Dual-Use-Dilemma in den Biowissenschaften Teil von Diskussionen bei internationalen Konferenzen und Organisationen, einschließlich der Weltgesundheitsorganisation WHO (Epstein 2012 und Referenzen darin). Neben existierenden internationalen Abkommen (die bereits vor diesen Diskussionen getroffen wurden und in Bezug auf Biosecurity und Synthetische Biologie relevant sind; Kap. IV.2.2.1) sind bis heute jedoch keine neuen internationalen, rechtlich bindenden Vereinbarungen entstanden. Allerdings wurden in den letzten Jahren von der Gensyntheseindustrie auf internationaler Ebene Verhaltensleitlinien (»Codes of Conducts«) entwickelt (Kap. IV.2.2.2). Darüber hinaus wurden u. a. in den USA, den Niederlanden und Deutschland Verhaltenskodizes für die Durchführung von potenziell besorgniserregenden Forschungsvorhaben formuliert. In den führenden Industrieländern existieren zudem Bestimmungen für den internationalen Export von biosecurityrelevanten Gütern und Technologien, einschließlich kommerziell synthetisierter Gensequenzen (PCSBI 2010b), u. a. in den USA durch die »Export Administration Regulations«[28] sowie in der Europäischen Union durch die Verordnung (EG) Nr. 428/2009 (Dual Use) (Kap. IV.2.2.1).

### INTERNATIONALE WAFFENKONTROLLVEREINBARUNGEN

#### BIOWAFFENKONVENTION

Die von den Vereinten Nationen ausgearbeitete Biowaffenkonvention (»Biological and Toxin Weapons Convention« [BTWC])[29] ist 1975 in Kraft getreten. Sie verbietet es staatlichen Parteien, mikrobielle oder andere biologische Agenzien oder Toxine – unabhängig von ihrem Ursprung oder ihrer Herstellungsmethode – in Mengen, die sich nicht zu Zwecken der Vorbeugung, des Schutzes oder durch andere friedliche Zwecke rechtfertigen lassen, zu entwickeln, zu produzieren, zu lagern oder anderweitig zu erwerben oder sie zu erhalten. Damit umfasst die Konvention auch potenziell »(bio)synthetisch« hergestellte Organismen und Toxine, was bereits 1986 in der Deklaration der zweiten Reviewkonferenz[30] festgehalten wurde. Die BTWC verfügt allerdings über keine formalen Mechanismen zur Überwachung oder Durchsetzung ihrer Einhaltung (Tucker 2010).

#### CHEMIEWAFFENKONVENTION

Diese 1992 von den Vereinten Nationen verabschiedete Chemiewaffenkonvention (»Chemical Weapons Convention« [CWC])[31] verbietet staatlichen Parteien grundsätzlich die Anwendung chemischer Waffen sowie deren Entwicklung, Erwerb, Produktion oder Lagerung. Existierende Waffen

28 www.bis.doc.gov/policiesandregulations/ear/index.htm (23.11.2015)
29 www.opbw.org/convention/documents/btwctext.pdf (23.11.2015)
30 www.opbw.org/rev_cons/2rc/docs/final_dec/2RC_final_dec_E.pdf (23.11.2015)
31 www.opcw.org/chemical-weapons-convention (23.11.2015)

und Produktionsstätten müssen vernichtet werden. Dabei umfassen chemische Waffen toxische Chemikalien oder deren Vorläufer – außer sie werden für friedliche Zwecke entwickelt und verwendet. Toxische Chemikalien werden definiert als solche, die durch chemische Wirkung auf Lebensprozesse den Tod, zeitweise Beeinträchtigungen oder dauernde Schäden bei Menschen oder Tieren verursachen können. Dies schließt alle solche Chemikalien ein, unabhängig von ihrem Ursprung oder der Art ihrer Produktion – und damit eindeutig auch «(bio)synthetisch« hergestellte Toxine. Im Gegensatz zur BTWC gibt es in der CWC einen Kontrollmechanismus (mit einem entsprechenden Kontrollorgan) zur Überprüfung des Abbaus chemischer Waffen in Mitgliedstaaten in Form von Inspektionen militärischer und industrieller Anlagen durch die Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons (OPCW).

### AUSTRALIA GROUP

Die Australia Group[32] wurde 1985 etabliert und ist ein informeller Zusammenschluss (d. h. die teilnehmenden Länder gehen keine rechtlichen Verpflichtungen ein) mit regelmäßigen Treffen von derzeit 41 Ländern plus der EU, die alle Unterzeichner der BTWC und der CWC sind. Ziel der Australia Group ist es, Exportkontrollen von Geräten, Materialien, Technologie sowie Software zur Entwicklung und Herstellung chemischer und biologischer Waffen zu harmonisieren und so deren Produktion und Verbreitung zu bekämpfen. Hierzu wurden Kontrolllisten für entsprechende Güter erstellt, einschließlich biologischer Agenzien wie Viren, Bakterien oder Toxine. Darüber hinaus fallen genetische Elemente/Nukleinsäuresequenzen oder gentechnisch veränderte Organismen, die mit der Pathogenität oder den Toxinen von gelisteten Organismen assoziiert sind bzw. solche enthalten, unter die Vereinbarung. Dies schließt entsprechende synthetisch hergestellte Gensequenzen ein. 2008 wurde ein spezielles Beratungsgremium zu Fragen der Synthetischen Biologie gegründet,[33] um auf Entwicklungen in diesem Bereich reagieren zu können.

## EUROPÄISCHE UND DEUTSCHE KONTROLLNORMEN

### VERORDNUNG (EG) NR. 428/2009 (DUAL USE)

Diese Verordnung des Rates der Europäischen Union von 2009 soll die Ausfuhr von Gütern mit doppeltem Verwendungszweck (die im Anhang der Verordnung aufgeführt sind) – einschließlich Software und Technologie, worunter auch Wissen in Form von technischen Daten fällt – aus der Europäischen Gemeinschaft wirksam kontrollieren. In Anlehnung an die Kontrolllisten der Australia Group gehören zu den aufgeführten Dual-Use-Gütern auch biologische Agenzien, wie Viren, Bakterien oder Toxine sowie genetische Elemente/Nukleinsäuresequenzen, die mit der Pathogenität von diesen Organismen oder den Toxinen assoziiert sind, und entsprechende gentechnisch veränderte Organismen. Dies schließt Produkte (z. B. synthetische Gene) oder Organismen der Synthetischen Biologie mit ein. Wie bei der Australia Group können darüber hinaus auch nichtgelistete Güter unter die Verordnung fallen, wenn der begründete Verdacht besteht, dass sie für einen missbräuchlichen Zweck verwendet werden sollen. Beispielsweise sind derzeit DNA-Synthesegeräte nicht in den Kontrolllisten erfasst, repräsentieren aber fraglos Dual-Use-Technologien.

32 www.australiagroup.net (23.11.2015)
33 www.australiagroup.net/en/agm_apr2008.html (23.11.2015)

**AUSSENWIRTSCHAFTSGESETZ UND AUSSENWIRTSCHAFTSVERORDNUNG**

Außenwirtschaftsgesetz (AWG) und Außenwirtschaftsverordnung (AWO) regeln die Lieferung von Gütern (einschließlich Technologien und Software) aus dem deutschen Wirtschafts- bzw. europäischen Gemeinschaftsgebiet in Drittländer außerhalb der EU.[34] Genehmigungspflichten durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) ergeben sich aus einer entsprechenden Ausfuhrliste[35] oder aus dem Anhang I der Verordnung (EG) Nr. 428/2009. Ein Teil der gelisteten Güter kann zusätzlich dem Ausführungsgesetz zu Artikel 26 Abs. 2 des Grundgesetzes (Gesetz über die Kontrolle von Kriegswaffen [KrWaffKontrG] unterliegen; eine Genehmigung ist dann durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie erforderlich.[36]

**GENTECHNIKGESETZ**

Im Gentechnikgesetz (GenTG) wird die Genehmigung zur Errichtung und des Betriebs gentechnischer Anlagen u. a. von der Sachkunde und der Zuverlässigkeit des Betreibers abhängig gemacht (Kap. VI.4.4) und davon, dass keine Tatsachen vorliegen, denen die Verbote der BTWC oder des KrWaffKontrG entgegenstehen (§ 11 GenTG).

## VERHALTENSKODIZES (»CODES OF CONDUCT«)

Mit dem Ziel, Sicherheitsaspekte und verantwortliches Handeln in der Forschergemeinde und in der Synthetischen Biologie zu fördern und zu verankern, sind national und international verschiedene Vorschläge für Verhaltenskodizes gemacht und erste Kodizes in Verbänden der Gensyntheseindustrie implementiert worden.

Einige der frühesten Überlegungen, Bestellungen von Gen- und Oligonukleotidsequenzen nach Ähnlichkeiten zu relevanten Genen von Krankheitserregern zu überprüfen und Reagenzien und Apparate zur Gensynthese zu registrieren, wurden von George Church (2004) formuliert. Er hatte außerdem schon früh zu einem Kodex für die Forschergemeinde aufgerufen, der ethische Standards in der praktischen Arbeit etablieren soll, darunter die Einhaltung von Regeln der Laborsicherheit, der Einbau von Selbstzerstörungsmechanismen in genetisch veränderte Organismen oder das Einführen von »Wasserzeichen« in veränderte Gene und Genome, um diese verfolgen zu können (Church 2005). Auf der zweiten internationalen Synbio-Konferenz (SB 2.0) 2006 wurde ein Entwurf für einen Verhaltenskodex zwar diskutiert, aber letztlich nicht angenommen.[37]

Hingegen haben die International Association Synthetic Biology (IASB) e. V. und das International Gene Synthesis Consortium (IGSC), zwei Firmenverbände, denen die überwiegende Mehrheit der Gensyntheseunternehmen angehören, für ihre Mitglieder verbindliche Verhaltenskodizes festgelegt.[38] Diese umfassen das Prüfen (Screening) aller bestellten DNA-Sequenzen auf Ähnlichkeiten

34 www.ausfuhrkontrolle.info/ausfuhrkontrolle/de/vorschriften/index.html (23.11.2015)
35 Die Ausfuhrliste ist grundsätzlich identisch mit Anhang I der Verordnung (EG) Nr. 428/2009 und wird um nationale Sonderpositionen ergänzt.
36 www.ausfuhrkontrolle.info/ausfuhrkontrolle/de/ (23.11.2015)
37 http://openwetware.org/wiki/Synthetic_Biology/SB2Declaration (23.11.2015)
38 http://synthetic-biology.net/2014/02/code-of-conduct-for-best-practices-in-gene-synthesis/; www.genesynthesisconsortium.org/images/pdf/IGSC%20Harmonized%20Screening%20Protocol-11_18_09.pdf (23.11.2015)

mit relevanten Gensequenzen aus pathogenen Organismen oder Viren, die Überprüfung der Legitimation von Bestellern (in Bezug auf Handelsbestimmungen und staatliche Listen von verdächtigen Bestellern), die Dokumentation von Screeningresultaten sowie die Information von Behörden im Falle positiver/verdächtiger Screeningergebnisse. Beide Verhaltenskodizes setzen strengere Standards als die (nichtbindenden) Richtlinien für Hersteller doppelsträngiger DNA-Moleküle, die durch das U.S. Department of Health and Human Services (DHHS 2010) formuliert wurden (Adam et al. 2011; Schmidt/Giersch 2011). Es wird geschätzt, dass mehr als 80 % der weltweiten kommerziellen DNA-Synthesekapazität derzeit den Verhaltenskodizes und Überprüfungen von IASB und IGSC unterliegen (PCSBI 2010b). Auf mehreren gemeinsamen Treffen, u. a. 2012 in Heidelberg und 2013 in Hong Kong, wurde mit Unterstützung u. a. des FBI, das seit Jahren im Rahmen seiner sogenannten »Synthetic Biology Tripwire Initiative« die Aktivitäten von Forschungseinrichtungen, Firmen und der DIY-Bioszene mit großer Intensität beobachtet (Kap. VI.4.4), Strategien und Herausforderungen der weiteren globalen Etablierung der Kodizes als Firmenstandards diskutiert (ICLS 2013).

## Zukünftige Gefährdungspotenziale und Governanceansätze 2.3

Die in Kapitel IV.2.1 beschriebenen Möglichkeiten der Synthetischen Biologie (einschließlich der kommerziellen Produktion synthetischer Genomsequenzen) sind die Grundlage für Bedenken, dass die Herstellung oder Veränderung von Viren oder Bakterien technisch einfacher werden und dadurch Missbrauchsmöglichkeiten für einen größeren Kreis von Akteuren jenseits der militärischen Biowaffenforschung entstehen könnten. Infrage kommen terroristische Gruppen, kriminelle Akteure oder psychopathische Einzeltäter (aus der institutionalisierten Wissenschaft oder auch von außerhalb). Darüber hinaus, so Befürchtungen, könnten durch Ansätze der Synthetischen Biologie nicht nur Pathogene oder Toxine (oder neue Formen davon) leichter hergestellt, sondern diese auch einfacher in waffenfähige Form (eine Voraussetzung für deren effektive Verbreitung) gebracht werden; z. B. durch Erhöhung ihrer Überlebensfähigkeit bzw. Stabilität (siehe z. B. UNICRI 2012).

Die angeführten Experimente zur Veränderung von Viren bzw. zum Herstellen von Viren über Gensynthese zeigen zum einen, dass das Einbringen eines Gens (wie Interleukin 4), dessen Auswirkungen man zu kennen glaubte, in ein Virus unvorhergesehene Wirkungen haben kann. Zum anderen wurde zunehmend sichtbar, dass mithilfe der DNA-Synthese und von Techniken der Genomassemblierung das komplette Erbmaterial von Viren anhand bloßer digitaler Information hergestellt werden kann und daraus Viren nach Infektion in Zellen – entsprechendes Fachwissen und Laborausrüstung vorausgesetzt – produziert werden können.

Die Synthese und der Zusammenbau von Virengenomen sowie die mögliche Infektion von Zellen/Organismen mit diesen Genomen sind allerdings je nach Virus unterschiedlich anspruchsvoll (Garfinkel et al. 2007; Jackson/Ramshaw 2010; Tucker 2011). So ist das Genom als solches (d. h. die »nackte« Nukleinsäure) nur bei bestimmten Viren (meist RNA-Viren mit sogenanntem »positiven RNA-Strang«) infektiös und kann in Zellen – teilweise auch in Zellextrakten – die Produktion von Virenpartikeln veranlassen, wobei die Infektiosität weniger stark ausgeprägt sein kann als bei kompletten Viren (Garfinkel et al. 2007; Jackson/Ramshaw 2010). Obwohl es somit für die Herstellung bestimmter Viren genügt, »nackte« (ihrem Genom entsprechende) DNA zu erhalten, wird die Wahrscheinlichkeit, dass Nichtexperten (d. h. Akteure ohne vertieftes methodisches Wissen und

besondere Labor-/Experimentiererfahrung mit den infrage kommenden Viren und Zellen), einschließlich der meisten Mitglieder der DIY-Bioszene (Kap. VI.4.4), Viren auf diese Weise herstellen, vermehren und infektiös halten können, als eher gering eingeschätzt (Suk et al. 2011; Tucker 2011; UNICRI 2012). Ebenso wird es derzeit als unwahrscheinlich angesehen, dass Nichtexperten Toxine oder pathogene Bakterien durch Methoden der Biotechnologie und der Synthetischen Biologie effizienter und einfacher herstellen oder erlangen können als bei einer Nutzung natürlicher Quellen (Suk et al. 2011; UNICRI 2012; vgl. auch Kap. VI.4.4). Dies sollte in noch stärkerem Maße für Möglichkeiten gelten, Pathogene und Toxine gezielt zu verändern, um diese effektiver zu machen, oder sogar völlig »neue« Pathogene herzustellen (Kap. IV.2.1).

Auf absehbare Zeit dürften es somit Experten mit Zugang zu entsprechender Laborausstattung aus dem Bereich der staatlich organisierten zivilen und vor allem der militärischen Forschung sein, welche die neuen Möglichkeiten der Pathogenitäts- und Toxizitätsverstärkung weiterentwickeln und anwenden können (Garfinkel et al. 2007; Suk et al. 2011; Tucker 2011; UNICRI 2012).[39] Mittel- bis langfristig könnten die Unterschiede in den Fähigkeiten von nichtstaatlichen Akteuren bzw. Nichtexperten und Staaten durch Fortschritte in der synthetischen Biologie jedoch möglicherweise kleiner werden, wenn die (gezielte) Veränderung biologischer Systeme einfacher würde (»de-skilling«) (Tucker 2011; UNICRI 2012), etwa durch Entwicklungen von effizienten Softwareprogrammen für das »Design« von Stoffwechselwegen, Datenbanken für funktionell gut charakterisierte »biologische Teile« (Biobricks) oder kommerziell angebotene, einfach anzuwendende Systeme für Veränderungen an Genomen bzw. Organismen (Gensynthesekits, DNA-Drucker). In welchem Umfang solche technischen Entwicklungen die bislang erforderliche Erfahrung und daraus resultierendes implizites, experimentelles Wissen (sogenanntes »tacit knowledge«) tatsächlich kompensieren können, ist jedoch schwer abzusehen (Tucker 2011).

## WAFFENKONTROLLVEREINBARUNGEN UND EXPORTBESCHRÄNKUNGEN

Wie in Kapitel IV.2.2 dargestellt, fiele die Herstellung von biologischen Waffen durch Ansätze der Synthetischen Biologie unter die Verbote der BTWC und teilweise (für die Herstellung von Toxinen) unter die CWC. Allerdings verfügt die BTWC als wichtigstes internationales Abkommen über keine Kontrollmechanismen zu ihrer Einhaltung (Tucker 2010). Damit existieren international kaum Mechanismen, um die Verbreitung von entsprechenden Technologien und Wissen zu verhindern, abgesehen von den freiwilligen Vereinbarungen der (relativ kleinen) Australia Group (Kap. IV.2.2). Für Ausfuhren aus der Europäischen Union gelten Exportbeschränkungen in Drittländer durch die Verordnung (EG) Nr. 428/2009 für Geräte, Materialien, Technologie sowie Software zur Entwicklung und Herstellung chemischer und biologischer Waffen. Bei der Ausfuhr von »Technologie« wurde wissenschaftliche Grundlagenforschung allerdings ausgenommen – wobei im Fall der Synbio als »klassische Technoscience« die Unterscheidung in Grundlagen- und angewandte Forschung kaum noch anwendbar erscheint (Kap. V). Auch im Falle der Arbeiten mit den veränderten H5N1-Vogelgrippeviren (Kap. IV.2.1) entschied die zuständige niederländische Regierung, dass die Arbeiten angewandte Forschung darstellen. Deshalb wurde für die Übermittlung des

39 In diesem Zusammenhang sind die Synbio-Förderaktivitäten der US-amerikanischen Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) (http://hplusmagazine.com/2015/02/15/biology-technology-darpa-backgame-big-vision-h/; 23.11.2015) sowie des britischen Defence Science and Technology Laboratory (Dstl) erwähnenswert.

Manuskripts an die Wissenschaftsmagazin »Science« eine Exportgenehmigung notwendig. Die Unterscheidung von angewandter Forschung und Grundlagenforschung durch die Kontrollbehörden weist diesen allerdings eine große Verantwortung zu, weil dadurch möglicherweise die Verbreitung von wichtigem Grundlagenwissen gefährdet werden kann.

Angesichts der Einschätzung von Experten, dass im gegenwärtigen Stadium die größte Gefahr für einen Missbrauch der Synthetischen Biologie von Nationalstaaten ausgeht (Garfinkel et al. 2007; UNICRI 2012), wurden für die BTWC eine Kontrollorganisation und Überwachungsmechanismen ähnlich denen in der CWC oder der zur Nichtverbreitung von Kernwaffen, einschließlich einer Organisation wie der International Atomic Energy Agency (IAEA), gefordert (Tucker 2010; UNICRI 2012). Gleichzeitig wird aber die Durchführbarkeit einer effizienten Überwachung aufgrund der Besonderheiten der biologischen Forschung im Vergleich zur Chemie- oder Nuklearforschung sehr skeptisch betrachtet (Garfinkel et al. 2007; Tucker 2010; UNICRI 2012). So werden im Vergleich zur Herstellung von waffenfähigen Nuklearmaterial keine großen und relativ einfach detektierbaren Apparate und Einrichtungen (wie z. B. Zentrifugen zur Herstellung von hochangereichertem Uran oder kerntechnische Anlagen für die Plutoniumherstellung) benötigt, sondern dieselben Materialien und (relativ unauffälligen) Geräte, die in jedem biotechnologischen Labor verwendet werden. Darüber hinaus wäre eine wohl unüberschaubar große Zahl von (bekannten) Laboratorien und Einrichtungen weltweit zu überprüfen.

## »CODES OF CONDUCT« FÜR DIE GENSYNTHESE

Die 2009 eingeführten Verhaltenskodizes für die kommerzielle Gensynthese der beiden wichtigen Firmenverbände IASB und IGSC verpflichten die ihnen angehörigen Unternehmen zur Überprüfung bestellter doppelsträngiger DNA-Sequenzen auf Ähnlichkeiten mit relevanten Gensequenzen aus Pathogenen sowie zur Überprüfung der Besteller, zur Dokumentation dieser Screeningresultate sowie zur Information von Behörden im Falle verdächtiger Ergebnisse (Kap. IV.2.2).

Mittels des Screeningverfahrens können allerdings naturgemäß nur bekannte potenziell gefährliche Sequenzen identifiziert werden, und das auch nur ab einer gewissen Länge, die eine eindeutige Zuordnung ermöglicht. Sehr kurze DNA-Stücke hingegen, sogenannte Oligonukleotide mit Längen von typischerweise 15 bis 40 Nukleotiden, lassen in den meisten Fällen keine Rückschlüsse auf eine heikle Gesamtsequenz zu, weil sie mit sehr vielen bekannten Sequenzen korrespondieren, damit zu unspezifisch sind und keine Warnung auslösen. Aus diesem Grund – und weil die Zahl von Oligonukleotidbestellungen zwei Größenordnungen über denen von Genen liegt (Bernauer et al. 2008; Maurer et al. 2009) – werden Bestellungen von Oligonukleotiden derzeit nicht überprüft. Um funktionelle Gensequenzen zu erhalten, die typischerweise 500 bis 2.000 Nukleotide lang sind, müssen mehrere Oligonukleotide in mehreren Schritten kombiniert werden. Dies erfordert Mühe, Zeit und Erfahrung. Prinzipiell könnten funktionelle Gene aus Krankheitserregern o. Ä. auf diese Weise gewonnen werden, ohne dass »Alarm« ausgelöst werden würde, insbesondere wenn die Oligonukleotidsequenzen aufgeteilt und bei verschiedenen Herstellern bestellt werden (»split order«) (Maurer et al. 2009; Schmidt/Giersch 2011).

Zukünftig könnten große und preisgünstige kommerzielle DNA-Synthesekapazitäten beispielsweise in Schwellenländern zu einer Herausforderung werden, wenn diese sich existierenden oder zukünftigen Normen nicht anschließen würden. Darüber hinaus könnten nichtnatürliche biologische Systeme die bestehenden Prüfrichtlinien umgehen bzw. unwirksam machen (Schmidt/Giersch

2011). Hierzu gehört XNA, d. h. Erbgutsubstanzen mit nichtnatürlichen Bausteinen (Pinheiro et al. 2012), die derzeit nicht Teil der Regularien sind, aber integriert werden könnten. Ein grundlegenderes Problem könnten veränderte genetische Codes (wie Quadrupletcodes über orthogonale Ribosomen (Neumann et al. 2010; Wang et al. 2007) werden, durch die (falls nicht bekannt) bei den Screeningverfahren Sequenzen für pathogene Proteine nicht erkennbar wären.

## KONTROLLE VON FORSCHUNGSVORHABEN UND WISSENSVERBREITUNG

Verbunden mit möglichen Problemen durch die Proliferation von Dual-Use-Wissen ist die in Kapitel IV.2.2 bereits angesprochene Frage, ob bzw. wann und wie die (weitere) Verbreitung von solchem Wissen, und damit auch die Veröffentlichung wissenschaftlicher Ergebnisse (oder zumindest relevanter Details davon), beschränkt oder unterbunden werden soll.

Zu dieser Frage fand 2003 – in der Folge der Terroranschläge vom 11. September 2001 sowie der Attentate mit durch Anthrax kontaminierten Briefen auf US-Kongressabgeordnete im gleichen Jahr – auf Initiative der US-amerikanischen National Academy of Sciences und der American Society for Microbiology eine Konferenz mit Vertretern von Zeitschriften der Biowissenschaften statt. Herausgeber führender Fachzeitschriften veröffentlichten anschließend eine Erklärung (Atlas et al. 2003a, 2003b u. 2003c), in der sie einerseits die Wichtigkeit der Veröffentlichung detaillierter wissenschaftlicher Ergebnisse hervorhoben, damit diese effizient kommuniziert und (u. a. zur unabhängigen Verifikation) reproduziert werden können. Andererseits wurden Bedenken anerkannt, dass veröffentlichte Ergebnisse für bioterroristische Zwecke genutzt werden könnten. Solche Ergebnisse sollten deshalb, wenn sie größere Risiken als gesellschaftlichen Nutzen mit sich bringen, nicht vollständig oder gar nicht veröffentlicht werden. Weiterhin sollten Herausgeber wirksame Begutachtungsprozesse für Manuskripte mit solchen Sicherheitsbedenken einführen (Atlas et al. 2003a, 2003b u. 2003c).

Die Frage, wie Experimente mit Dual-Use-Implikationen zu beurteilen sind und veröffentlicht werden sollen, ist mit den in Kapitel IV.2.1 beschriebenen Gain-of-Function-Experimenten der US-amerikanisch/japanischen und der niederländischen Forschungsgruppe mit veränderten H5N1-Vogelgrippeviren verstärkt in den Blickpunkt gerückt. Das US-amerikanische National Science Advisory Board for Biosecurity (NSABB), ein die US-Regierung beratendes Gremium, hatte im Dezember 2011 an die Autoren der Arbeiten (Herfst et al .2012; Imai et al. 2012) sowie an die Wissenschaftszeitschriften »Science« und »Nature« (bei denen die Arbeiten eingereicht wurden) die Empfehlung ausgesprochen, die Daten nicht im Detail zu veröffentlichen, sondern nur ausgewählten Gruppen zugänglich zu machen. Obwohl diese Empfehlung in keiner Weise bindend war, hatten die Zeitschriften die Arbeiten daraufhin zunächst nicht publiziert. Im Januar 2012 kündigten die beiden Forschergruppen ein zunächst 60-tägiges Moratorium für die Weiterführung ihrer Arbeiten an (was sie erst im Januar 2013 wieder aufhoben) (Fouchier et al. 2013a u. 2013b). Die Weltgesundheitsorganisation (WHO), welche die Forscher selbst mit den Virusproben versorgt hatte (Klöckner 2014), führte im Februar 2012 Anhörungen verschiedener Akteure durch und empfahl daraufhin eine Veröffentlichung der Daten. Auch das NSABB revidierte (in einer nicht unumstrittenen Sitzung) seine Auffassung und befürwortete die volle Veröffentlichung der Arbeiten (Maher 2012).[40] Sowohl die

40 http://blogs.nature.com/news/2012/05/nih-responds-to-criticism-over-handling-of-flu-papers.html (23.11.2015)

WHO (2012) als auch das NSABB (2012) gelangten letztendlich zu der Einschätzung, dass der aus diesem Wissen und seiner Zugänglichkeit entstehende Nutzen für die öffentliche Gesundheit (v. a. die Überwachung von potenziell gefährlichen Mutationen in Grippeviren) mögliche Gefahren und Risiken durch Missbrauch oder ungewollter Freisetzung überwiegt. Darüber hinaus sind in die Entscheidung der WHO die Berücksichtigung der Schwierigkeiten und ungelösten Fragen bezüglich möglicher Regelungen zur Weitergabe von Wissen nur an bestimmte Gruppen (z. B. Wissenschaftler im Gesundheitsbereich) mit eingeflossen. Beide Arbeiten wurden schließlich im Mai bzw. Juni 2012 publiziert; die der niederländischen Gruppe (Herfst et al. 2012) allerdings erst nach Erteilung der Exportgenehmigung für das Manuskripts an »Science« in Übereinstimmung mit der Verordnung (EG) Nr. 428/2009.

Infolge der Diskussionen um die H5N1-Publikationen ist in den USA im März 2012 eine Regierungsrichtlinie verabschiedet worden, die alle Bundeseinrichtungen, die Forschung durchführen oder finanzieren, anhält, Arbeiten mit 15 aufgeführten Viren bzw. Organismen auf angegebene Kriterien für DURC zu überprüfen sowie gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen, um Risiken einzudämmen – einschließlich der möglichen Modifikation bzw. dem Herausnehmen von Daten aus Publikationen (United States Government 2012; Wolinetz 2012).

Im Sommer 2014 wurden mehrere Laborunfälle (ohne Personenschaden) in US-amerikanischen Hochsicherheitslaboren bekannt und lösten, zusammen mit neuen, umstrittenen Publikationen über veränderte Vogelgrippeviren (Linster et al. 2014; Sutton et al. 2014; Watanabe et al. 2014), eine erneute, intensive Debatte über DURC-Vorhaben und deren angemessene Erfassung und Kontrolle aus (Butler 2014; Cohen 2014). Im September 2014 wurde dann eine weitere Richtlinie (»United States Government Policy for Oversight of Life Sciences Dual Use Research of Concern«) mit einem größeren Anwendungsbereich veröffentlicht (United States Government 2014). Sie soll ab September 2015 gelten und bezieht sich auf alle Forschungsvorhaben, auch außerhalb von Bundeseinrichtungen, national wie international, wenn sie Mittel von der US-Regierung erhalten. Eine fundamentale Erweiterung besteht darin, dass die Verantwortung für das Erfassen, das Melden und damit das Auslösen des institutionellen Reviewprozesses von DURC-Forschung sehr explizit bei den Forschungsleitern gesehen wird. Der Kernbegriff ist die geteilte Verantwortung zwischen Forschenden, den geförderten Institutionen sowie den Forschungsförderungseinrichtungen der US-Regierung. Vorhaben, die nicht unter die Richtlinie fallen, werden dringend aufgefordert, ähnliche Überwachungsprozeduren zu etablieren.

Im Oktober 2014 überraschte dann die US-Regierung mit einem zunächst einjährigen Finanzierungsstopp für Gain-of-Function-Experimente mit Grippe-, SARS- und MERS-Viren (Kaiser 2014).[41] Die Zeit soll genutzt werden, um erneut die Vertretbarkeit und Rahmenbedingungen von DURC-Vorhaben mit hochpathogenen Viren zu prüfen. Die zustimmenden und ablehnenden Reaktionen aus der Wissenschaft (McNeil 2014) zeigten einmal mehr, dass die Forscher alles andere als einig sind in ihrer Beurteilung der Wichtigkeit und Gefährlichkeit entsprechender Forschungsvorhaben.

41 Allerdings wurden nach einer Anhörung in Washington, D.C. im Dezember 2014 für sieben Forschungsprojekte wieder Ad-hoc-Ausnahmen geschaffen (Karberg 2014b).

## Debatte und Aktivitäten in Deutschland 2.4

Auch in Deutschland wurde die Dual-Use-Problematik mit Blick auf besorgniserregende biosicherheitsrelevante Forschungsvorhaben (DURC) in den vergangenen Jahren von Wissenschaft und Politik engagiert aufgegriffen und intensiv diskutiert.

Die dabei aufgeworfenen Fragen betreffen die Förderung des Problembewusstseins in Lehre und Forschung, die früh- bzw. vorzeitige Erfassung von DURC sowie die mögliche Regulierung der Zulassung von DURC bzw. der Publikation(sbeschränkung) entsprechender Ergebnisse. Außerdem stellt sich die Frage nach der Öffnung der innerwissenschaftlichen Debatte zur Beteiligung weiterer gesellschaftlicher Akteure.

Den Anfang machte im Jahr 2008 die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) mit einem »Verhaltenscodex: Arbeit mit hochpathogenen Mikroorganismen und Toxinen«, der seit März 2013 in aktualisierter Form vorliegt (DFG 2013). Darin werden Arbeiten aufgeführt, die »als besonders relevant im Hinblick auf die ›Dual-Use-Problematik‹« einzuschätzen sind, und Projektleiter werden aufgefordert, von sich aus in ihren Anträgen auf sensitive Aspekte im Hinblick auf die Dual-Use-Problematik einzugehen. Gutachter sollen die Informationen der Antragsteller beurteilen und eine Empfehlung an die Fachkollegien geben können, die dann »gegebenenfalls einen Vorschlag im Hinblick auf den Umgang mit den beantragten Arbeiten machen. Bei Bedarf kann die zuständige Senatskommission beziehungsweise der Senat in das Verfahren eingeschaltet werden.«

Publikationsverbote hält die DFG im Umgang mit sensiblen Forschungsergebnissen für ungeeignet, um die Missbrauchsgefahr zu minimieren. Sie vertritt die Meinung, dass Publikationen in Peer-Reviewed-Journals im Hinblick auf Arbeiten zu hochpathogenen Mikroorganismen und Toxinen weiterhin möglich sein müssen. Die Veröffentlichung von Ergebnissen sei eine zentrale Voraussetzung für die wissenschaftliche Selbstevaluation. Nur bekannten Gefahren könne begegnet werden.

Die DFG schlägt vor, an Universitäten und außeruniversitären Institutionen regelmäßig Seminare und andere Veranstaltungen für Studierende, Doktoranden und Postdoktoranden auf dem Gebiet der Arbeit mit hochpathogenen Mikroorganismen und Toxinen anzubieten. Die jährlichen Unterweisungen nach dem Gentechnikgesetz seien ebenfalls eine Gelegenheit, für die Dual-Use-Problematik zu sensibilisieren.

Der Branchenverband Biotechnologie-Industrie-Organisation Deutschland e. V. schloss sich dem DFG-Verhaltenscodex bereits 2008 in einem Positionspapier an (BIO Deutschland 2008).

Die Max-Planck-Gesellschaft e. V. (MPG) hat die Dual-Use-Problematik in ihren 2010 veröffentlichten »Hinweisen und Regeln zum verantwortlichen Umgang mit Forschungsfreiheit und Forschungsrisiken« aufgegriffen (MPG 2010). Diese beschränken sich nicht auf den Bereich der Biowissenschaften, sondern nennen u. a. Materialforschung und Nanotechnologie, Informatik, aber auch Psychologie, Soziologie und Rechtswissenschaften als missbrauchsgefährdet. Das Ziel der Regeln ist es, ein Verfahren zu schaffen, »mit dem der Forscher ethische Zweifelsfragen besser lösen und dadurch dem Vorwurf unethischen Verhaltens vorbeugen kann«. Danach muss ein Forscher über gesetzliche Regelungen hinaus »auch ethische Grundsätze beachten« und »mögliche Folgen sowie die Einsatz- und Missbrauchsmöglichkeiten seiner Arbeiten und deren Beherrschbarkeit mitbedenken«. Risiken sollen bereits im Vorfeld analysiert und »Maßnahmen zur Risikominimierung sollen sowohl vor Beginn als auch während eines laufenden Forschungsvorhabens geprüft und

durchgeführt werden«. Primäres Ziel der Risikoanalyse sind laut MPG eine verantwortliche Durchführung und Kommunikation der Forschung, aber als »Ultima Ratio« sollen sowohl »völliger Verzicht auf Kommunikation und Veröffentlichung der Forschungsergebnisse« wie auch der grundlegende »Verzicht auf nicht verantwortbare Forschung« in Betracht kommen. Um die betroffenen Wissenschaftler sowie ihrer jeweiligen Vorgesetzten bei der Einhaltung der Regeln zu unterstützen, hat die MPG für Rechtsfragen eine besondere Compliancestelle in der Generalverwaltung geschaffen sowie eine Ethikkommission gebildet, die in Zweifelsfragen, die sich aus der Risikoanalyse ergeben, angerufen//befasst werden kann.

Die Leibniz-Gemeinschaft hat Ende 2012 einen Verhaltenskodex zum Thema Biosicherheit verabschiedet. Als Ziel wird formuliert, »Einrichtungen, die mit mikrobiologischen Ressourcen umgehen oder solche vorhalten, davor zu bewahren, direkt oder indirekt zum Missbrauch von biologischen Agenzien und Toxinen beizutragen« (Leibniz-Gemeinschaft 2012). Der Verhaltenskodex der Leibniz-Gemeinschaft beschränkt sich auf eine Beschreibung der Zielsetzungen in den Bereichen Biorisikomanagement, Bewusstseinsbildung, Berichterstattung, interne und externe Kommunikation, Forschung und Wissenstransfer, Zugangskontrolle sowie Abgabe, Verpackung und Transport. Konkrete Verfahren oder möglichen Gremien werden nicht beschrieben.

Nicht übersehen werden sollte – hierauf hat der Deutsche Ethikrat (DER 2014, S. 147) in seiner Stellungnahme hingewiesen –, dass Forschung an Universitäten, die nicht von der DFG gefördert wird oder bei der keine Kooperation mit der MPG besteht, ebenso wie die Projektförderung durch Bundesministerien von keinem der genannten Kodizes erfasst wird.

Eine intensive bundespolitische Befassung mit dem Thema setzte im Jahr 2012 ein. Im Frühjahr 2012 wendeten sich die NRO Genethisches Netzwerk (GeN) und Testbiotech mit einem offenen Brief an die Bundeskanzlerin und forderten sie darin auf, sich für einen Stopp der Gain-of-Function-Versuche (Kap. IV.2.1) zur Herstellung von neuen Varianten des Vogelgrippevirus (H5N1) und eine Beschränkung des Zugangs zu den Genomdaten einzusetzen (GeN/Testbiotech 2012). Vor dem Hintergrund der anhaltenden Diskussionen um die Publikation der H5N1-Studie beauftragte dann die Bundesregierung im Juli 2012 den Deutschen Ethikrat mit der Erarbeitung einer Stellungnahme zu Biosicherheit und Forschungsfreiheit (Bundesregierung 2012, S. 12 f.). Im November 2012 führte der ABFTA des Deutschen Bundestages ein öffentliches Fachgespräch zum Thema »Umgang mit sicherheitsrelevanten Forschungsergebnissen« durch, an dem Vertreter der großen Forschungsorganisationen sowie des GeN teilnahmen.[42] Eine weitere Anhörung zum Thema führte der Deutschen Ethikrat im April 2013 durch, bevor er im Mai 2014 seine (einstimmige) Stellungnahme »Biosicherheit – Freiheit und Verantwortung in der Wissenschaft« vorlegte (DER 2014). Ihre Empfehlungen (Kasten IV.3), die eine gesetzliche Regelung für DURC fordern, dürften für die kommenden Jahre den Referenzpunkt für die weitere politische Behandlung des Themas in Deutschland bilden. Kernpunkte der Empfehlungen des Ethikrates sind die Erstellung eines bundesweit, d. h. für alle Arten von öffentlichen und privaten Forschungseinrichtungen, gültigen Forschungskodexes für einen verantwortlichen Umgang mit Biosecurityfragen sowie die Einrichtung einer zentralen, interdisziplinär zusammengesetzten DURC-Kommission, die alle Forscher vor der Durchführung von DURC-Projekten informieren müssen. Gerade weil der Ethikrat von lediglich ca. zehn DURC-Projekten pro Jahr in Deutschland ausgeht, sieht er eine dezentrale Behandlung z. B. durch medizinische Ethikkommissionen als ungeeignet an, weil sich dabei die Versammlung von nötigem Sachverstand

42 http://webarchiv.bundestag.de/cgi/show.php?fileToLoad=2963&id=1223 (23.11.2015)

für diese speziellen Fragestellungen nicht mit vertretbarem Aufwand gewährleisten lässt (Vöneky 2014). Eine gesetzliche Verankerung einer solchen entscheidungsfähigen Kommission sei nötig, weil eine gezielte, ausnahmsweise Beschränkung der Forschungsfreiheit, die ein fundamentales Grundrecht repräsentiert, einer sehr starken Legitimation bedürfe, die von freiwilligen Selbstverpflichtungskodizes und zugehörigen Gremien kaum geboten werden könne.

**KASTEN IV.3: »BIOSICHERHEIT – FREIHEIT UND VERANTWORTUNG IN DER WISSENSCHAFT« – EMPFEHLUNGEN DES DEUTSCHEN ETHIKRATES**

1. *Schärfung des Bewusstseins für Biosecurityfragen in der Wissenschaftsgemeinschaft*

Um eine Kultur der Verantwortung zu fördern, wird die Implementierung von Biosecurityfragen in die Curricula für Studierende und Doktoranden sowie in Ausbildungsordnungen im Bereich der relevanten Wissenschaften empfohlen. Entwickelt werden sollen Biosecuritylehrmaterialien für die Aus-, Fort- und Weiterbildung. Gefördert werden sollen öffentliche Diskurse zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit.

2. *Erstellung eines bundesweit gültigen Forschungskodexes für einen verantwortlichen Umgang mit Biosecurityfragen*

Dieser soll durch Hochschulen, Forschungseinrichtungen und wissenschaftliche Fachgesellschaften unter Nutzung von Biosecuritykompetenz beim Robert-Koch-Institut und bei Sicherheitsbehörden entwickelt und von allen relevanten öffentlichen und privaten Forschungseinrichtungen ausdrücklich übernommen und bei Bedarf konkretisiert werden. Dabei wird die aktive Rolle der Forschenden betont, die als erste einschätzen müssen, ob ihre Forschungsvorhaben biosecurityrelevant sind, Anlass zur Besorgnis bieten und daher in den Zuständigkeitsbereich der DURC-Kommission (siehe 4.) fallen.

3. *Forschungsförderung*

Es soll gewährleistet werden, dass der Forschungskodex beachtet und eingehalten wird. Außerdem soll die öffentliche Forschungsförderung verstärkt Risiko- und Begleitforschung zu biosicherheitsrelevanten Fragen unterstützen.

4. *Gesetzlicher Regelungsbedarf*

> Gesetzliche Definition besorgniserregender biosecurityrelevanter Forschung (DURC)
> Einrichtung einer zentralen, interdisziplinären DURC-Kommission, die Expertise der Zivilgesellschaft einbezieht; enge Kooperation mit ZKBS
> Verpflichtende Beratung vor und bei Durchführung von DURC; begleitendes Monitoring durch den zuständigen DURC-Beauftragten
> Evaluation des DURC-Beratungsverfahrens nach jeweils vier Jahren

5. *Internationale Initiativen*

Anstoß einer internationalen Reflexion über Chancen und Risiken von DURC; Ziel: möglichst verbindliche, einheitliche, global gültige Standards

Quelle: nach DER 2014, S. 190 ff.

Eine direkte Reaktion auf die Stellungnahme des Ethikrats war die Veröffentlichung der Empfehlungen »Wissenschaftsfreiheit und Wissenschaftsverantwortung« durch DFG und Leopoldina im Juni 2014, die einer Anpassung an den Kodex der MPG entspricht (DFG/Leopoldina 2014, S. 3).[43] Eine explizite rechtliche Regulierung im Sinne verpflichtender Kontroll- und Beratungsverfahren für DURC, wie sie der Ethikrat fordert, wird darin nicht behandelt. Der Vizepräsident des Robert-Koch-Instituts, das laut Ethikrat für die Genehmigungsverfahren von DURC zuständig sein könnte, hat sich in einer ersten Einschätzung ähnlich wie andere Wissenschaftler skeptisch gegenüber einer verpflichtenden Kontrolle durch seine Behörde geäußert (Karberg 2014a).

Im November 2014 nahm die Nationale Forschungsplattform für Zoonosen und die AG Zoonosen und Infektionsforschung (AG ZI) der TMF – Technologie- und Methodenplattform für die vernetzte medizinische Forschung e. V. zu den Empfehlungen des Deutschen Ethikrates Stellung (TMF/Nationale Forschungsplattform für Zoonosen 2014). Sie schlossen sich »weitgehend der gemeinsamen Stellungnahme der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ... an« und befürworteten insbesondere den Kommentar der Gesellschaft für Virologie (GfV 2014) vom Juni 2014 zur Stellungnahme des Deutschen Ethikrates, demzufolge keine zusätzliche Dual-Use-Kommission geschaffen werden sollte. Vielmehr solle eine bestehende Kommission mit entsprechendem wissenschaftlichem Sachverstand wie die ZKBS mit der Aufgabe der externen Risikoanalyse betraut werden.

Ebenfalls im November 2014 veranstalteten Leopoldina, DFG und Ethikrat ein gemeinsames Symposium zum Thema »Freiheit und Verantwortung der Wissenschaft: Rechtfertigen die Erfolgschancen die Risiken?«, bei dem der Fokus auf weitere Technologiebereiche wie 3-D-Druck und Big Data erweitert wurde (Leopoldina 2015). Auch hier drehte sich der auf die Biosicherheit fokussierte Teil der Diskussion um die vom Ethikrat aufgeworfenen Fragen, ob eine gesonderte DURC-Kommission verpflichtend eingeführt und wenn ja, wo sie angesiedelt und wie sie besetzt werden sollte.

Im Dezember 2014 fand dann in Hannover auf Einladung der Volkswagen-Stiftung und der Max-Planck-Gesellschaft eine hochkarätige internationale Konferenz zum Thema »Dual Use Research on Microbes: Biosafety, Biosecurity, Responsibility« statt, an der u. a. die beiden Arbeitsgruppenleiter der Gain-of-Function-Experimente bei Vogelgrippeviren (Kap. IV.2.1), Ron Fouchier und Yoshihiro Kawaoka, teilnahmen (Karberg 2014b). Von vielen Teilnehmern wurde betont, dass die Frage, ob einzelne DURC-Experimente insbesondere mit Blick auf öffentliche Gesundheit untersagt oder aber gerade befürwortet werden sollten, nicht ausschließlich von wissenschaftlichen Fachleuten und schon gar nicht lediglich dem engeren Expertenkreis z. B. aus der Virologie kompetent und legitim beantwortet werden können. Vielmehr müsse geradezu naturgemäß die Gesellschaft insgesamt, die solche Experimente finanziert und auch ihre möglichen Folgen zu tragen hat, an dieser Entscheidung beteiligt werden.

In all den genannten Dokumenten und Debatten wird deutlich, dass es keinen eindeutig besten Weg geben kann, wie ein Missbrauch wissenschaftlicher Forschung(sergebnisse) verhindert werden kann. Zur kontinuierlichen Bearbeitung dieser Fragestellung hat im März 2015 ein Gemeinsamer Ausschuss zum Umgang mit Sicherheitsrelevanter Forschung von Leopoldina und DFG die Arbeit

43 Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erklärte daraufhin in einer Pressemitteilung, dass seine im Mai 2012 verabschiedeten ethische Leitlinien im Einklang mit den Empfehlungen von DFG und Leopoldina stünden (www.kit.edu/kit/pi_2014_15335.php; 23.11.2015).

aufgenommen (Leopoldina/DFG 2015). Dieser ist rein wissenschaftlich besetzt (greift also die erwähnten Forderungen nach einer breiteren gesellschaftlichen Beteiligung nicht auf) und soll Forschungseinrichtungen bei der Umsetzung der genannten Empfehlungen (DFG/Leopoldina 2014) unterstützen. Laut Leopoldina/DFG (2015) sollten idealerweise bis 2017 an allen deutschen Forschungseinrichtungen Kommissionen für Ethik der Forschung etabliert werden. Diese sollen die einzelnen Institutionen in die Lage versetzen, sachgerecht und verantwortungsvoll mit Diskussionsfällen aus der eigenen Arbeit umzugehen und selbst über diese zu entscheiden. Falls eine Entscheidung vor Ort im Einzelfall nicht angemessen möglich sein sollte, kann die Leopoldina zusätzlich Ad-hoc-Arbeitsgruppen einsetzen, die im engen Austausch mit dem Gemeinsamen Ausschuss eine Risiko-Nutzen-Beurteilung des jeweiligen Forschungsinhalts vornehmen. Darüber hinaus soll der Gemeinsame Ausschuss die Entwicklungen auf dem Gebiet der sicherheitsrelevanten Forschung in Deutschland beobachten, mögliche Handlungsfelder identifizieren und Leopoldina und DFG in diesen Fragen beraten.

## Fazit 2.5

Einer Kontrolle der unerwünschten Proliferation von Wissen und Technologien in den Biowissenschaften stehen insgesamt große technische, aber auch konzeptionelle, rechtliche und ethische Herausforderungen gegenüber. Letztere sind begründet in Fragen nach der Einschränkung der grundgesetzlich geschützten Forschungsfreiheit sowie konkreter, potenziell wichtiger Möglichkeiten für die Gesundheitsforschung und Gesundheitsvorsorge; aber auch in Fragen dazu, ob und wie Wissen selektiv an ausgewählte Gruppen weitergegeben werden kann und wer über dieses Wissen und die Auswahl der »Empfangsberechtigten« entscheiden könnte bzw. sollte.

Es ist Konsens, dass neben internationalen Waffenkontrollabkommen, gesetzlichen Exportbeschränkungen für Dual-Use-Güter und -Technologien sowie möglichen anderen gesetzlichen Regelungen zusätzliche Governancemaßnahmen erforderlich sind, um die Gefahr des Missbrauchs von biowissenschaftlicher Forschung im Allgemeinen und von Synthetischer Biologie im Besonderen zu verringern. Als Fundament wird eine Bewusstseinsschaffung in allen Arten von Forschungseinrichtungen gesehen – sowohl auf institutioneller als auch auf individueller Ebene. Insbesondere Universitäten wären gehalten, die Themen Biosicherheit (Biosafety und Biosecurity) und Dual Use systematisch in ihre Curricula aufzunehmen und konkrete Biosicherheitsschulungen im umfassenden Sinn durchzuführen. Hier scheint in Deutschland ein großes Defizit zu bestehen (Hoppe 2011).

Mit Blick auf die konkreten Missbrauchsgefahren einer künftig deutlich leistungsstärkeren, billigeren und dezentralen Gen(om)synthese erscheint die von Potthof (im Namen des GeN) geforderte Meldepflicht für »gensynthetisierende« Einrichtungen sowie eine Registrierung von DNA-Synthesizern durchaus plausibel (DER 2013, S. 41 f.). Gutwillige Akteure und ihre Aktivitäten in seriösen Forschungseinrichtungen (einschließlich der DIY-Bioszene; Kap. VI.6) könnten hierdurch vorrangig zur Abwehr von Biosafety-, gegebenenfalls Bioterrorgefahren erfasst werden. Biocrime- und Bioterrorrisiken resultieren allerdings am ehesten von Akteuren aus Organisationen und Ländern, die sich gerade nicht durch (über)staatliche Vorschriften kontrollieren lassen. Daher müssen hier vermutlich eher geheimdienstliche und sicherheitspolitische Maßnahmen verfolgt werden.

Insgesamt erscheint es sowohl bei universitätsinternen und sonstigen institutionellen Forschungsaktivitäten als auch bei offeneren Ansätzen wie dem iGEM-Wettbewerb oder in der DIY-Biologie

(Kap. VI) wichtig, eine Kultur der Transparenz, der offenen gesellschaftlichen Debatte und Auseinandersetzung sowie der gemeinsamen Verantwortung zu fördern. Dies ist auch die Leitidee des RRI-Konzepts der EU-Forschungsförderung, das in Kapitel V.2.7 näher beleuchtet wird. Alle, die mit biologisch aktiven Substanzen arbeiten, sollten ein starkes Sicherheitsbewusstsein entwickeln und Kenntnisse haben, wen sie gegebenenfalls in die Bewertung der Gefährlichkeit ihrer Vorhaben miteinbeziehen können, ohne sich unangemessen überwacht fühlen zu müssen (wie dies in den USA der Fall sein kann, wo das FBI die präventive Kontrolle von Biosecuritygefahren gewährleisten möchte und u. a. für die DIY-Bioszene systematisch Verbindungsbeamte benannt hat; Kap. VI.4.4). Die von Leopoldina und DFG anvisierte Schaffung von multidisziplinären Kommissionen für Ethik der Forschung an allen deutschen Forschungseinrichtungen wäre ein wichtiger Schritt, wobei zusätzlich zentral angebotene Kompetenzen und eine starke Rückbindung an die gesamte Gesellschaft (insbesondere auch in den jeweiligen Städten bzw. Kommunen) notwendig erscheint.

# SYNBIO UND ÖFFENTLICHKEIT – VOM NICHTWISSEN ZUR MITGESTALTUNG V.

Die Synthetische Biologie war von Beginn an durch eine enge Verbindung von wissenschaftlichen und anwendungsbezogenen Fragen gekennzeichnet. Als »New and Emerging Science and Technology« (NEST), so der Jargon der EU-Forschungspolitik, bzw. als Technoscience (im Sprachgebrauch der Sozialwissenschaften, Schmidt et al. 2009; Gelfert 2013) geriet sie früh in den Blick der Forschungspolitik und der Begleitforschung (Kap. II.). Charakteristisch für Technosciences ist die enge Verzahnung des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses mit der technologischen Entwicklung. Technowissenschaftliche Forschung ist in hohem Maße abhängig von Technologie, die nicht nur die Untersuchungsmethoden liefert, sondern auch die Untersuchungsobjekte produziert. Außerdem ist das Erkenntnisinteresse der Technosciences weniger auf die Generierung und Überprüfung von Hypothesen gerichtet als vielmehr auf die Gewinnung von Fähigkeiten zur Manipulation technowissenschaftlicher Objekte (Nordmann 2011, beispielhaft zeigt sich dies an Objekten wie nanoskaligen Materialien oder Modellorganismen wie E.-coli-Bakterien). Eine Konsequenz dieser engen Verknüpfung von Wissenserzeugung und -verwendung in einem »seamless web« (Hughes 1986, S. 286) und ein weiteres Charakteristikum von Technosciences ist auch die vergleichsweise große Bedeutung, die Akteuren außerhalb des institutionellen Wissenschaftsbetriebs bei der Entwicklung des Forschungsgebiets zukommt. Zum einen wird ein Großteil der technowissenschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeit durch den privaten Sektor geleistet (Sukhdev 2012), zum anderen spielen technologische Visionen, wie sie durch Beratungsunternehmen, Künstler und die populäre Kultur einschließlich der DIY- bzw. Makerszene (Kapitel VI.) verbreitet werden, eine wichtige Rolle in der Entwicklung technowissenschaftlicher Felder (Coenen 2006).

Die enge Verbindung einer hohen Unsicherheit des Wissens (wie sie für neu entstehende, dynamische Forschungsfelder typisch ist) mit hoher gesellschaftlicher Relevanz (wie sie für anwendungsbezogene Technologien üblich ist) hat die Technowissenschaften zu einem beliebten Objekt der Begleitforschung und damit der TA gemacht. In der Vergangenheit – so die Diagnose von Wissenschaft und Politik – hatte eine systematische Debatte der gesellschaftlichen Folgen wissenschaftlich-technologischer Entwicklungen oft erst so spät eingesetzt, dass ethische Bedenken oder auch soziale Anforderungen an diese Entwicklungen nicht mehr adäquat berücksichtigt werden konnten. In der Folge kam es häufig zu einer breiten Ablehnung der bereits fertig entwickelten Produkte bzw. installierten Systeme (als Paradebeispiele gelten die Grüne Gentechnik und die Atomenergie). Als Reaktion darauf wurde in der TA ein gezieltes »upstream engagement« gefordert, d. h. eine möglichst systematische Befassung mit den gesellschaftlichen Potenzialen und Herausforderungen bereits in Frühstadien der Entwicklung.

Die Synbio ist derzeit wohl das Paradebeispiel für dieses gezielte »upstream engagement«. Sowohl auf EU-Ebene (im Forschungsförderungsprogramm Horizont 2020) als auch in Mitgliedsländern, wie den Niederlanden, dem Vereinigten Königreich und Deutschland, wurden zum Teil aufwendige öffentliche Diskursprozesse als neuartige Formen der Begleitforschung und der Governance von Forschung und Entwicklung angestoßen.

Es zeigen sich an ihr daher auch beispielhaft die Herausforderungen, die durch das frühe Stadium entstehen: Es ist fast zwangsläufig unklar (bzw. es soll ja auch noch offen, um gestaltbar zu sein!),

wohin die Entwicklung geht und welche Produkte daraus entstehen werden. Die breitere Öffentlichkeit nimmt die Entwicklung in diesem frühen Stadium noch kaum zur Kenntnis und muss erst motiviert werden, sich damit auseinanderzusetzen. Bei der Synbio kommt dazu noch die Unklarheit der Definition, sodass verschiedene Akteure ganz unterschiedliche Verständnisse von dem Gegenstand haben, über den sie jedoch gemeinsam sprechen sollen.

Das folgende Kapitel behandelt Ausgangspunkte, Aktivitäten und Schwierigkeiten der öffentlichen Auseinandersetzung über die Synbio. Kapitel V.1 befasst sich mit der bisherigen Vermittlung des Themas in der Öffentlichkeit und bietet einen kurzen Überblick über die Darstellung der Synthetischen Biologie in den Printmedien (Kap. V.1.1), den Wissensstand und die Einstellung der Bevölkerung in Deutschland und in Europa (Kap. V.1.2) sowie über verschiedene Strategien bzw. Rahmungen bei der öffentlichen Kommunikation des Themas Synbio und die Rollen unterschiedlicher Akteursgruppen dabei, insbesondere von Umwelt-NRO (Kap. V.1.3).

Kapitel V.2 behandelt zunächst das Konzept einer »hermeneutischen TA« als neuen Analyseansatz der Begleitforschung in Frühstadien der Technikentwicklung( Kap. V.2.1) und beschreibt dann wichtige Diskursaktivitäten zur Synthetischen Biologie in mehreren europäischen Ländern (Niederlande, Vereinigtes Königreich, Deutschland; Kap. V.2.2 bis V.2.5) sowie im Rahmen von EU-Projekten (Kap. V.2.6). Letztere sind teilweise sehr eng an konkrete forschungspolitische Programmatiken (in Form sogenannter Roadmaps) gekoppelt und sollen eine umfassende Beteiligung der Gesellschaft im Sinn einer gemeinsamen, verantwortungsbasierten Entwicklung und Nutzung von Wissenschaft und Technologie gewährleisten. Sie sind Resultat bzw. erste Experimentierfelder neuer Ansätze der Governance von (öffentlich geförderten) FuE-Prozessen, die unter dem Begriff »Responsible Research and Innovation« (RRI) seit einigen Jahren insbesondere von der EU-Kommission stark befördert werden (Kap. V.2.7; vgl. hierzu auch TAB 2015c).

## Synbio und Öffentlichkeit 1.

Die meisten Berichte und Stellungnahmen, die gegen Ende der 2000er Jahre von wissenschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Akteuren zur Synbio erschienen, darunter insbesondere TA- und Innovationsstudien, forderten neben der weiteren Beobachtung und Förderung von Forschung und Entwicklung einen umfassenden, vorausschauenden gesellschaftlichen Dialog zur Synthetischen Biologie (Sauter 2011, S. 21). Allerdings wäre es dafür nötig, dass die Synbio einen gewissen Bekanntheitsgrad in der Bevölkerung erlangt, wofür eine Medienberichterstattung eine Voraussetzung ist. Im Folgenden wird die Behandlung in den Printmedien beleuchtet, die in der Informationsverbreitung über (komplexe und damit oft komplizierte) wissenschaftliche Themen neben dem Fernsehen nach wie vor eine prägende Rolle spielen (Leopoldina/IfD Allensbach 2015).

### Berichterstattung in den Printmedien 1.1

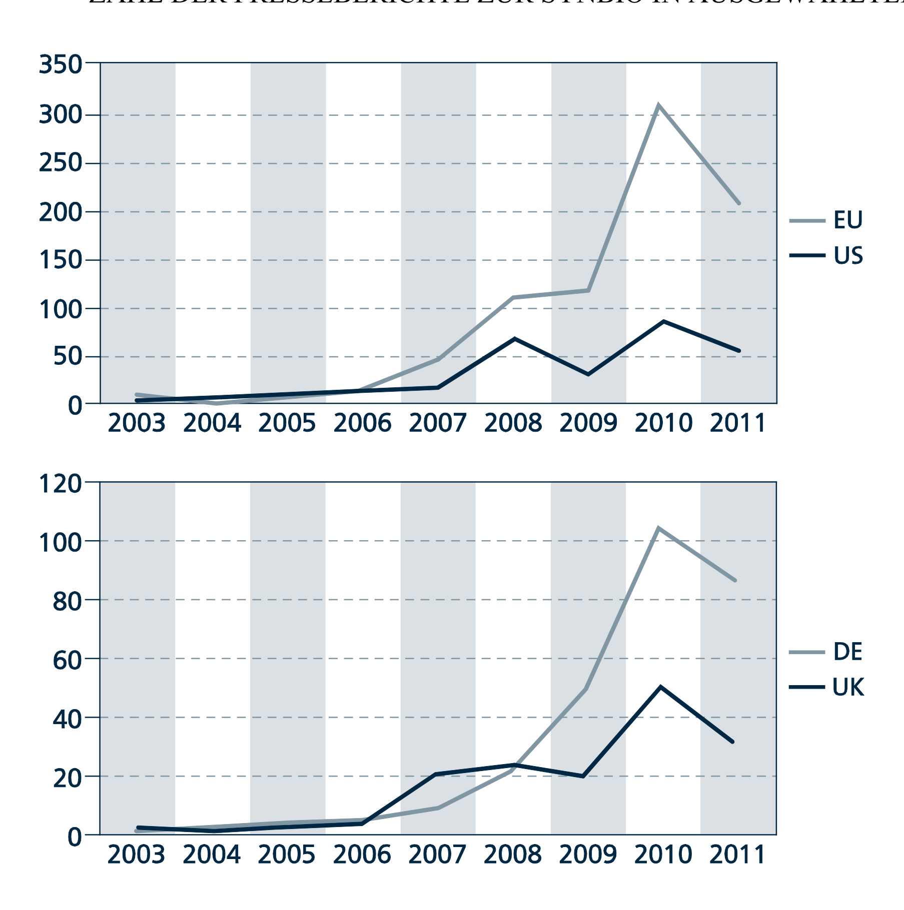
Etwa seit dem Jahr 2006 ist das Medieninteresse an der Synbio gestiegen, was sich an einer wachsenden Zahl an Zeitungsartikeln zur Synbio messen lässt (Arnaldi/Lorenzet 2014, S. 16; Pauwels et al. 2012, S. 5). Diese Artikel werden i. d. R. in den Wissenschaftsteilen überregionaler Tages- und Wochenzeitungen veröffentlicht, aber zumindest auch in einzelnen deutschen Regionalzeitungen

gibt es eine verstärkte Berichterstattung (Lehmkuhl 2011, S. 23 u. 29 ff.). Die erfolgreiche Konstruktion eines komplett synthetischen Chromosoms der Bäckerhefe (Annaluru et al. 2014) zog am 28. März 2014 sogar Meldungen auf den Titelseiten vieler Tageszeitungen nach sich, darunter auch auflagenstarke Boulevarderzeugnisse. Inwiefern sich daraus eine nachhaltige Steigerung der öffentlichen Aufmerksamkeit für die Synbio ergibt, bleibt jedoch abzuwarten.

Coenen et al. (2010, S. 56) kamen in einer Medienanalyse zu dem Ergebnis, dass sich die Printmedien in Deutschland früher und stärker mit dem Thema Synbio auseinandergesetzt haben als in vergleichbaren europäischen Ländern. Laut einer US-amerikanischen Untersuchung erschienen zwischen 2008 und 2011 auch mehr Artikel über Synbio in deutschsprachigen als in amerikanischen Zeitungen (Pauwels et al. 2012, S. 5 u. 20). Im Vergleich mit anderen europäischen Ländern wird der Abstand in absoluten Zahlen noch wesentlich größer. Vor allem im Jahr 2010 hat es einen signifikant hohen Anstieg in deutschsprachigen Zeitungen gegeben.

Nach Lehmkuhl (2011, S. 22 f.) waren die Veröffentlichungen der Forschungsergebnisse von Wissenschaftlerteams des J. Craig Venter Institutes im Januar 2008 und im Mai 2010 über die erfolgreiche Synthese und den Einbau der Komplettgenome in Mycobakterien als »wissenschaftsjournalistische Topereignisse« der Anlass für einen Großteil der Artikel. In den USA war darüber hinaus die Veröffentlichung des Berichts der PCSBI im Dezember 2010 mit besonderer Medienresonanz verbunden (Pauwels et al. 2012, S. 6).

ABB. V.1 ZAHL DER PRESSEBERICHTE ZUR SYNBIO IN AUSGEWÄHLTEN LÄNDERN




EU = Frankreich, Deutschland, Niederlande, Spanien, Italien und Großbritannien

Quelle: Pauwels et al. 2012, S. 5

Zweifelsohne ist Craig Venter einer der am stärksten medial präsenten Akteure in den Life Sciences bzw. der angewandten Molekulargenetik/Genomforschung und der Synbio und spielt dadurch eine zentrale Rolle bei der Außenwahrnehmung dieses Wissenschaftsfeldes. Vor allem das von Venter propagierte Schlagwort vom »künstlichen (bzw. synthetischen) Leben« stieß auf ein breites Medienecho (Coenen et al. 2010, S. 57; Cserer/Seiringer 2009, S. 30; Gschmeidler/Seiringer 2012, S. 166; Pauwels/Ifrim 2008, S. 9 ff.; Pauwels et al. 2012, S. 7). Laut Schummer (2011) provozierte Venter speziell in der deutschen Presse zahlreiche religiös konnotierte Schlagzeilen, u. a. die Süddeutsche Zeitung (»Craig Venter spielt Gott«; Charisius 2010«) oder Die Zeit (»Ein Schöpfungsakt«; Bahnsen 2010).[44] Ein ähnlicher Gottesbezug sei in der Presse der vorwiegend katholisch geprägten Länder Mittel- und Südeuropas sowie Großbritanniens und Irlands zu finden gewesen, während in anderen Weltregionen dieser Bezug vollständig fehle (mit Ausnahme der ehemaligen britischen Kolonien).[45] Schummer (2011, S. 119 ff.) selbst hält dieses Phänomen für einen Ausdruck eines »populistischen Religionsverständnisses« in Teilen der europäischen, speziell der deutschsprachigen Presse und weist darauf hin, dass in der Presse des Vatikans jeglicher Gottesbezug als theologisch falsch abgelehnt wurde.

Nach Lehmkuhl (2011, S. 44 f.) waren die Journalisten in ihren Artikeln hauptsächlich damit beschäftigt, sich und den Lesern verständlich zu machen, was die Synbio eigentlich ist bzw. was das Neue an ihr im Vergleich zu anderen Technologien darstellt. Im Vordergrund standen daneben die Nützlichkeit der Synbio sowie mögliche Risiken.[46] Zu einem ähnlichen Ergebnis kam man auch in anderen Medienanalysen, in denen betont wurde, dass durch die Konzentration auf nützliche Anwendungen häufig ein oberflächlich positives Bild der Synbio vermittelt wurde (Coenen et al. 2010, S. 69 f.; Cserer/Seiringer 2009, S. 33 f.; Kronberger et al. 2009, S. 21 ff.; Pauwels/Ifrim 2008, S. 4 f.). Dieses positive Image der Synbio konzentrierte sich in Europa genauso wie in den USA auf die Bereiche Energie, Medizin und Umwelt (tendenziell in dieser Reihenfolge; Coenen et al. 2010, S. 60 ff.; Gschmeidler/Seiringer 2012, S. 167; Pauwels/Ifrim 2008, S. 18; Pauwels et al. 2012, S. 17). Vor allem die Perspektive einer neuen Generation von Biotreibstoffen (Kap. III.2.4) interessierte die Journalisten, aber auch synthetisches Artemisinin (Kap. III.3.4) wurde oft behandelt.

Laut Pauwels et al. (2012, S. 14) wurden in späteren Jahren allerdings in der amerikanischen und der europäischen Presse zunehmend mögliche Risiken der Synbio diskutiert. Während bis 2008 die Debatte in den USA insgesamt vorwiegend optimistisch gewesen sei und die größte Sorge einem potenziellen Missbrauch der Synbio durch »Bioterroristen« gegolten habe, änderte sich dies nach 2008. In den USA dominierte seitdem das Thema »Biosafety« die Risikodebatte, während Artikel über die ethischen Risiken im Vergleich mit Europa eher selten waren. Pauwels et al. (2012) gehen davon aus, dass dieser Schwenk in der amerikanischen Debatte auch auf die Ölpest im Golf von Mexiko 2010 zurückzuführen war, welche durch technisches Versagen verursacht wurde.

In einer Studie der Universität Padua wurde die englischsprachige Berichterstattung zur Synbio im zeitlichen Verlauf von 2006 bis 2013 untersucht (Arnaldi/Lorenzet 2014). Sie bestätigt den Trend

---

44 Nach Gschmeidler/Seiringer (2012, S. 167) wies etwa ein Drittel der deutschsprachigen Artikel zu dieser Zeit einen religiös konnotierten Deutungsrahmen auf.

45 Schummer (2011, S. 232 f.) sah Polen als Ausnahme unter den katholischen Ländern. Dort hatte es 2010 keinen offenen Gottesbezug in der Berichterstattung über die Synbio gegeben . Elsbach (2011, S. 16 f.) bestätigte dies und belegte zudem, dass in Polen der Bezug zu der Phrase »künstliches Leben« 2010 sehr stark war.

46 Nach Lehmkuhl (2011, S. 44 f.) waren 48 % der in den Artikeln getätigten Deutungsaussagen positiv gegenüber je 26 % negativen und neutralen Aussagen.

zur Thematisierung kontroverser Fragestellungen in den Jahren 2010 bis 2011, insbesondere bezogen auf die Arbeiten (und die Öffentlichkeitsarbeit) Craig Venters. Davor sei die Darstellung der Synbio stärker durch Bezugnahmen auf bereits etablierte Topoi wie den Klimawandel und die Gentechnik geprägt gewesen. Für die letzten Jahre (2012–2013) machten Arnaldi/Lorenzet (2014) allerdings eine neuerliche Verschiebung des Schwerpunkts aus. Über die Synthetische Biologie wird in der englischsprachigen Presse nun stärker vor dem Hintergrund von Fragen der wirtschaftlichen bzw. industriellen Entwicklung berichtet.

Die Ähnlichkeiten zur amerikanischen Berichterstattung sind in Europa in Großbritannien am größten, was sich in einer vergleichbar hohen Sorge um einen möglichen »Bioterrorismus« ausdrückte (Coenen et al. 2010, S. 63 f.). In der europäischen Presse insgesamt wurden durchgehend ethische Risiken am häufigsten diskutiert, vor allem die Fragen der (wirtschaftlichen) Gerechtigkeit von Patenten, die Idee vom Menschen als gottgleichem Schöpfer (»homo creator«) sowie Herausforderungen, die aus den Entwicklungen der Synbio für die Begriffe »Leben« und »Natürlichkeit« resultieren (Coenen et al. 2010, S. 64 ff.; Gschmeidler/Seiringer 2012, S. 167 f.; Pauwels/Ifrim 2008, S. 20; Pauwels et al. 2012, S. 15 f.).

Ähnlich wie die Darstellung (hypothetischer) zukünftiger Anwendungen trägt die Diskussion des Begriffs »künstliches Lebens« dazu bei, die Synbio mit einem emotionalen und wertegeladenen Deutungsrahmen zu versehen. Um die zunächst abstrakte Verbindung von synthetischen Mikroorganismen zu generellen, philosophischen Vorstellungen über das Leben sichtbar zu machen, wird in der medialen Debatte auf verschiedene Metaphern zurückgegriffen. Die am häufigsten verwendete ist wohl die der (biologischen) »Maschine«, aber auch »Lego«, »Design«, »(göttliche) Schöpfung« und »Software« werden in der deutschsprachigen Presse gerne genutzt (Coenen et al. 2010, S. 57 ff.; Cserer/Seiringer 2009, S. 30; Diekämper 2012;[47] Lehmkuhl 2011, S. 40 ff.).

Lehmkuhl (2011, S. 47 ff.) resümierte, dass es trotz der partiellen Diskussion von ethischen Risiken der Synbio bis dato keinen erkennbaren öffentlichen Streit um die Deutungshoheit gebe, was an der geringen Artikelzahl und daran liege, dass die Debatte bislang vornehmlich zwischen Akteuren der politischen Peripherie (v. a. Wissenschaftler, daneben wenige Umweltaktivisten) geführt werde. Dies könne sich ändern, falls sich relevante politische Akteure zum Thema Regulierung der Synbio vernehmbar zu Wort melden sollten.

## Wahrnehmung und Bewertung der Synbio im europäischen Vergleich 1.2

Zur Wahrnehmung der Synbio in der Bevölkerung und zu den Einstellungen gegenüber der Synbio gibt es bislang nur wenige Daten. Der einzige größere Datensatz zur Bevölkerungseinstellung gegenüber der Synbio in Europa stammt aus der Eurobarometerumfrage von 2010 (Gaskell et al. 2010).[48] Aktuellere Daten – allerdings nur für die bundesdeutsche Bevölkerung – wurden im Januar 2015 auf Basis einer Befragung im Herbst 2013 von der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina vorgelegt (Leopoldina/IfD Allensbach 2015). Beide Studien belegen einen geringen

47 Diekämper (2012) betonte zusätzlich die Bedeutung der Metaphern »Spiel« und »Hybris« für das öffentliche Sprechen über Wissenschaft.

48 Eurobarometerumfragen werden seit 1973 in regelmäßigen Abständen im Auftrag der Europäischen Kommission durchgeführt. In diesen für die europäische Bevölkerung repräsentativen Meinungsumfragen geht es um Einstellungen zu sozialen und politischen Themen. Dabei werden aktuelle Fragen mit solchen kombiniert, die bei jeder Umfrage in der gleichen Form gestellt werden.

Bekanntheitsgrad der Synbio in der Bevölkerung.[49] Die wichtigsten Ergebnisse sind (Hampel 2012; Leopoldina/IfD Allensbach 2015):

Etwa 18 % der *in Deutschland Befragten* hatten im Jahr 2010 bereits von der Synbio gehört, obwohl das Thema im Alltag fast nicht kommuniziert wurde. Auch 2013 antworteten noch 82 % der Befragten, sie wüssten kaum etwas über die Synbio, nur 2 % gaben an, sich »ganz gut« auszukennen. Nach Hampel (2012, S. 239 f.) sei auffällig, dass höher Gebildete wesentlich häufiger von der Synbio gehört hatten als weniger Gebildete. Alle Befragten wünschten sich tendenziell mehr Informationen über die Synbio, speziell Nutzen- und Risikoerwartungen interessieren (Hampel 2012, S. 241 ff.). Zwar bekundeten laut der Studie von Leopoldina/IfD Allensbach (2015, S. 50) nur 41 % der Befragten ein Interesse an der Synbio (davon 10 % »ausgeprägtes« Interesse), wohingegen 56 % sich »nicht vorstellen können, dass dieses Thema sie überhaupt interessieren könnte«. Das Interesse vergrößerte sich jedoch deutlich, wenn nicht abstrakt über Synbio gesprochen wurde, sondern Anwendungsmöglichkeiten der Synbio wie »die Herstellung künstlicher Zellen zur Bekämpfung von Krankheiten« (58 % der Befragten bekunden Interesse) oder »die Herstellung von Treibstoffen durch künstliche Bakterien« (48 % der Befragten interessiert) vorgestellt wurden (Leopoldina/IfD Allensbach 2015, S. 50).

Trotz dieses geringen Wissens und Interesses gegenüber der Synbio haben viele Befragte offenbar eine Einstellung zu ihr ausgebildet. Spontane emotionale Reaktionen auf den Begriff selbst fallen bei der Mehrheit der Befragten (60 %) negativ aus. Bei den Assoziationen stehen »Eingriffe in die Natur« und »Risiko, Gefahr« an erster Stelle (87 % respektive 82 % der Befragten nennen diese Assoziationen). Positive Assoziationen werden zwar ebenfalls von einer Mehrheit der Befragten genannt, allerdings im Durchschnitt von einer geringen Zahl (beispielsweise verbinden 69 % die Synbio mit »Spitzenforschung«, 66 % mit »Zukunft« und 64 % mit »Fortschritt«)(Leopoldina/IfD Allensbach 2015, S. 46 f.).[50] Insgesamt verbinden 57 % der Befragten die Synbio mit Sorgen (gegenüber 27 %, die sie mit Hoffnungen verbinden). Im Vergleich mit anderen Forschungs- und Technologiebereichen, wie z. B. der Erforschung von Alterskrankheiten, der Klimaforschung, der Informationstechnologie, der Nanotechnologie und der Grünen Gentechnik, erweist sich die Synbio damit als besonders stark mit Sorgen verbunden – nur die Grüne Gentechnik weckt bei noch mehr Befragten Sorgen. Allerdings verändert sich diese Einschätzung deutlich, wenn konkrete Anwendungen und der Nutzen der Synbio angesprochen werden – insbesondere bei der »Schaffung künstlicher Zellen, die man zur Bekämpfung von Krankheiten in den Körper einsetzt« überwiegen die Hoffnungen, ebenso bei der Herstellung von Treibstoffen, während sie sich beim »Nachweis und Abbau von Schadstoffen in der Umwelt« die Waage halten. Ähnlich steigt auch der Anteil derjenigen, die grundsätzlich die Forschung im Bereich Synbio befürworten, von 34 % bei der Diskussion

---

49 Der beteiligte Forscher, Jürgen Hampel, hat seine Auswertung für den Themenband Synbio der Arbeitsgruppe »Gentechnologiebericht« (Köchy/Hümpel 2012) mit der Überschrift »Synbio – ein unbekannte Technologie« überschrieben (Hampel 2012).

50 Hinsichtlich des Assoziationsmusters unterscheidet sich die Synbio deutlich sowohl von der Grünen Gentechnik als auch von der Nanotechnologie. Zwar sind bei der Synbio wie bei der Grünen Gentechnik Assoziationen mit »Eingriffen in die Natur« und »Risiko, Gefahr« häufig, allerdings sind Assoziationen mit beispielsweise »Zukunft«, »Fortschritt« bei der Synbio deutlich häufiger. Darin ähnelt sie der Nanotechnologie, die aber wiederum seltener mit »Eingriffen in die Natur« und »Risiko, Gefahr« in Verbindung gebracht wird (Leopoldina/IfD Allensbach 2015, S. 48).

über Synbio generell auf zwischen 51 und 59 %, wenn Anwendungen in den Bereichen der Herstellung von Treibstoffen, des Abbaus von Schadstoffen oder der Gesundheit angesprochen werden (Leopoldina/IfD Allensbach 2015, S. 56 f.).

Im europäischen Vergleich wird die Synbio in Deutschland gegenüber allen untersuchten Ländern am kritischsten bewertet (gemessen aus der Differenz von Zustimmung und Ablehnung; Tab. V.1). Gemäß Eurobarometer 2010 lehnten 21 % der in Deutschland Befragten diese Technologie kategorisch ab, 27 % würden die Synbio bei strengerer Regulierung befürworten (Hampel 2012, S. 248 ff.). Der restliche Teil lehnte die Synbio mit Ausnahmen ab (31 %) oder hatte keine Meinung dazu (19 %). Nur ein sehr geringer Prozentsatz der Befragten (3 %) befürwortete die Synbio ohne weitere Regulierung. Insgesamt unterstützt eine knappe Mehrheit *aller in Europa Befragten* die Synbio bei angemessener Regulierung, wobei eine lineare Abhängigkeit zwischen der Ablehnung und dem Bildungsgrad sowie der Religiosität der Befragten besteht, d. h. gering gebildete sowie sehr religiöse Menschen lehnen die Synbio stärker ab.[51] Zudem befürworten insgesamt Männer die Synbio stärker als Frauen; diese sind zwar nicht explizit ablehnender, aber unentschlossener in ihrer Bewertung[52] (Hampel 2012, S. 248 ff.).

TAB. V.1 GESAMTHALTUNG UND GOVERNANCEPRÄFERENZEN DER BEVÖLKERUNG ZU SYNBIO LAUT EUROBAROMETERUMFRAGE 2010

| | Deutschland | Österreich | Niederlande | Schweiz | Großbritannien | EU gesamt |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nettozustimmung/ -ablehnung* | -22 | -19 | -5 | -3 | 9 | 1 |
| wissenschaftliche Delegation | 32 % | 38 % | 49 % | 39 % | 55 % | 52 % |
| wissenschaftliche Deliberation | 9 % | 12 % | 9 % | 13 % | 12 % | 10 % |
| moralische Delegation | 21 % | 18 % | 28 % | 23 % | 14 % | 15 % |
| moralische Deliberation | 38 % | 32 % | 14 % | 25 % | 19 % | 23 % |

* Differenz von Zustimmung und Ablehnung

Quelle: Gaskell et al. 2010, S. 34 u. 72

Hinsichtlich der *Governancepräferenzen* war die Mehrheit der in Deutschland Befragten grundsätzlich anderer Meinung als die Mehrheit aller in Europa Befragten (Hampel 2012, S. 243 ff.). Während es europaweit eine deutliche Mehrheit für den Modus »wissenschaftliche Delegation« gab (EU: 52 %, Deutschland¨32 %), bevorzugte in Deutschland die größte Gruppe unter den Befragten den Modus »moralische Deliberation« (Deutschland: 38 %, EU: 23 %). Hampel (2012) leitete daraus ab,

51 Hampel (2012) wies darauf hin, dass die sehr religiösen Menschen in Deutschland eine Ausnahme seien und die Synbio nicht verstärkt ablehnen würden.

52 Diese stärkere Befürwortung der Synbio durch Männer könnte auch das Ergebnis von Cserer/Seiringer (2009, S. 34) unterstützen, wonach über die Synbio in deutschsprachigen Zeitungen i. d. R. mit männlich konnotierten Metaphern berichtet wird.

dass es in Deutschland eine starke Tendenz für eine öffentliche Entscheidungsweise nach moralischen Kriterien gäbe, während die Mehrheit der in Europa Befragten sich für eine expertenbasierte Entscheidungsweise nach wissenschaftlichen Kriterien ausspräche. Eher gering Gebildete sowie eher religiöse Menschen würden mehr Wert auf moralische Entscheidungskriterien legen, während eher höher Gebildete sowie die wenig Religiösen eher wissenschaftliche Kriterien bevorzugen. Nur wenig Unterstützung gab es für die Modi »wissenschaftliche Deliberation« und »oralische Delegation« (Deutschland: 9 u. 21 %).[53] Der Vergleich mit anderen europäischen Ländern, in denen die Synbio ähnlich intensiv adressiert wird, verdeutlicht die Sonderstellung Deutschlands mit der starken Präferenz bei der moralischen Deliberation und der relativen Skepsis gegenüber wissenschaftlicher Delegation. Auffällig ist darüber hinaus die Dominanz der summierten moralischen Governancepräferenzen, die in Deutschland mit 59 % noch deutlich vor Österreich (50 %) und der Schweiz (48 %) liegt. Aus diesem Bild der öffentlichen Wahrnehmung der Synbio in Deutschland leitete Hampel (2012, S. 253 f.) die Forderung an die Politik ab, die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen dieses neuen Forschungsfeldes aktiver zu gestalten und vor allem seriöse Informationen über die Risiken und Nutzen einer breiten Öffentlichkeit bereitzustellen. Auch die ethischen Bedenken müssten dabei adressiert werden.

Auch die Zustimmungsraten zur Synbio sind in diesen fünf Ländern deutlich unterschiedlich. Während die »Nettozustimmung/-ablehnung« in der EU ist mit 1 % ganz leicht positiv ist, ist sie in Deutschland und Österreich mit -22 und -19 % stark und in den Niederlanden und der Schweiz mit -5 und -3 % leicht negativ. In Großbritannien hingegen wurde mit 9 % eine deutlich positive »Netto-Zustimmung« ermittelt.

Gaskell et al. (2010) leiteten aus diesen Zahlen ab, dass die Menschen in den untersuchten Ländern dann beginnen würden, die Synbio insgesamt negativer zu bewerten, wenn der Modus »moralische Deliberation« im Verhältnis zum Modus »wissenschaftliche Delegation« wichtiger werde. Ein ähnliches Muster findet sich unter den Eurobarometerthemen auch im Fall von »GM Food«, also bei gentechnisch veränderten Lebensmitteln, sowie bei der Nanotechnologie (wobei letztere grundsätzlich deutlich höhere Zustimmungsraten als die Synbio aufweist; Gaskell et al. 2010, S. 73 f.).

Insgesamt teilten Gaskell et al. (2010) die untersuchten 32 Länder in fünf Cluster eint, was ihr generelles Verhältnis von Ethik und Wissenschaft anbelange:

> »Interest in ethics/Science 1st« (u. a. Frankreich, Großbritannien, Schweden)
> »Distributional fairness/Science 1st« (u. a. Norwegen, Polen)
> »Science 1st/Low to moderate interest in ethical issues« (u. a. Italien, Spanien)
> »Distributional fairness/Science 2nd« (Bulgarien, Deutschland, Griechenland, Österreich, Slowenien, Schweiz, Zypern)
> »Moral Governance/Science 2nd« (u. a. Dänemark, Irland, Niederlande)

Mit der Zuordnung Deutschlands zum Cluster »Distributional fairness/Science 2nd« wird unterstrichen, dass hierzulande (wie auch in den beiden weiteren deutschsprachigen Ländern, Österreich und der Schweiz) ein vergleichsweise hoher Wert auf die Frage gelegt werde, wer von einer neuen Technologie profitiere und wer Schaden nehmen könne (Gaskell et al. 2010, S. 105 ff.).

53 Hampel (2012) wies darauf hin, dass die Tendenz der in Deutschland Befragten zu »moralischer Deliberation« noch wesentlich weiter von der europaweiten Tendenz abweichen würde, wenn die in Deutschland Befragten aus der Gesamtmenge herausgerechnet werden würden.

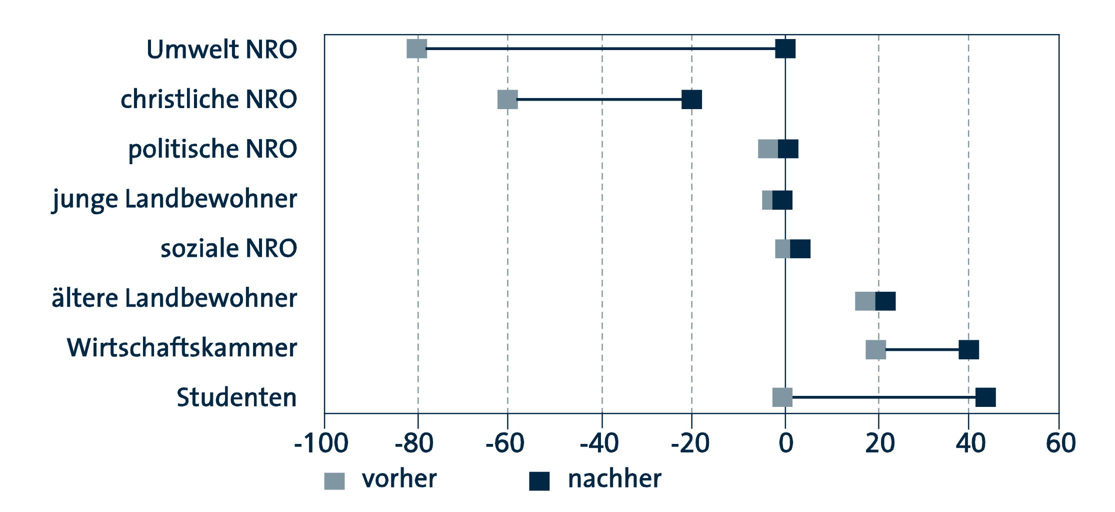
Schon oft wurde darauf hingewiesen, dass keine generelle Technikfeindlichkeit in Deutschland beobachtet werden kann (zuletzt Technopolis Group/F.A.Z.-Institut 2014). Im Bereich der Biotechnologien zeigen die Daten des Eurobarometers allerdings doch eine deutliche »Technikskepsis«. Deutschland gehört in allen Eurobarometerbefragungen seit Anfang der 1990er Jahre zu den Ländern mit der niedrigsten Gesamtzustimmungsraten. Lediglich Österreich wies im Jahr 2010 einen geringeren »Nettooptimismus« in Bezug auf Biotechnologien auf als Deutschland. Gleichzeitig ist die Bekanntheit der einzelnen Biotechnologien überdurchschnittlich hoch und das Vertrauen in die wichtigsten (über)staatlichen und ökonomischen Akteure der Biotechnologie eher niedrig (Gaskell et al. 2010, S. 20, 78 u. 82).

Kaiser (2012, S. 189) bewertete die Daten insgesamt optimistischer und verwies darauf, dass zwar die »alten« neuen Biotechnologien (Klonen, Stammzellen, GMO) negativ, die Informations- und Nanotechnologie hingegen auch in Deutschland positiv bewertet würden. Zudem würden Wissenschaftler und Ingenieure in Deutschland nach wie vor ein hohes Vertrauen in der Bevölkerung genießen. Für Befürworter und bestimmte Akteure liegt es daher nahe, die Verbindung der Synbio mit der Informations- und der Nanotechnologie zu betonen, um von deren höherer Akzeptanz zu profitieren (Torgersen/Schmidt 2012, S. 128 f.).

Allerdings scheint es eine große Diskrepanz zwischen der (Selbst-)Darstellung der Synbio als Informations- oder Nanotechnologie und der Art und Weise, wie die Synbio von Laien aufgefasst wird, zu geben. Darauf deutet ein Experiment von Kronberger et al. (2009 u. 2012) hin, bei dem geprüft wurde, wie bestimmte Zeitungsartikel zur Synbio von mehreren, nach demografischen Kriterien gebildeten Gruppen aufgenommen und diskutiert wurden (Abb. V.2). Auffällig war, dass alle Gruppen von sich aus die Synbio als Teil der Biotechnologie wahrnahmen, wobei schnell Parallelen zu bereits bekannten und kontroversen Themen wie Human Enhancement, Klonen (von Menschen) oder Grüne Gentechnik gezogen wurden, ohne dass diese Parallelen in den Zeitungsartikeln zu finden gewesen seien (hierzu und zum Folgenden Kronberger et al. 2012, S. 179 u. 182 ff.). Die Laien waren in diesem Zusammenhang oft darüber überrascht, dass die Synbio noch nicht viel weiter fortgeschritten sei.

Deutlich wurde, dass alle Gruppen mehr oder weniger dieselben Informationen aus den Zeitungsartikeln entnommen hatten, diese aber sehr unterschiedlich diskutierten und bewerteten. Insgesamt war bei an der Synbio von vornherein interessierten Gruppen nach der Diskussion eine viel stärkere Polarisierung zu verzeichnen, während weniger am Thema interessierte Gruppen die Synbio so neutral bewerteten wie zu Beginn des Experiments (Abb. V.1). Dabei wurde bei potenziellen Kritikern (Umwelt- und Kirchengruppen) die Haltung deutlich negativer, die von Wirtschaftsvertretern und Studenten (als angehende Wissenschaftler) deutlich positiver.

ABB. V.2 POLARISIERUNG VON GRUPPENMEINUNGEN IM GESPRÄCHSVERLAUF ÜBER SYNTHETISCHE BIOLOGIE




Positive Werte entsprechen Zustimmung zur Synbio, negative Werte Ablehnung.

Quelle: Torgersen/Schmidt 2012, S. 121, auf Basis von Kronberger et al. 2012, S. 186

In einem ähnlich angelegten Experiment mit zwei Fokusgruppen in den USA stellten Hart Research Associates (2014) fest, dass die Bewertung der Synbio stark von den jeweils diskutierten Anwendungen abhängt. Positive Reaktionen rufen demnach vor allem medizinische Anwendungen hervor. Gemischt ist der Eindruck bei Biokraftstoffen und Umweltsensoren bzw. dem Einsatz von Mikroorganismen zur Reinigung der Umwelt. Hier werden neben dem Nutzen für die Umwelt mögliche Risiken für diese, aber auch für die Gesundheit gesehen. Letztere stehen bei den Versuchsgruppen schließlich im Vordergrund, wenn es um Anwendungen bei Chemikalien für Haushalt und Nahrungsmittel oder bei der Schädlingsbekämpfung geht. Neben Ängsten vor unkontrollierbaren Folgen spielen hier auch ethische Bedenken eine Rolle. In beiden Gruppen wurde eine grundlegende Offenheit gegenüber der Synthetischen Biologie bei gleichzeitigem Bewusstsein für mögliche negative Auswirkungen beobachtet (Hart Research Associates 2014).

Auch Kronberger et al. (2012) wiesen darauf hin, dass alle Gruppen in ihrem Experiment die Artikel kritisch besprochen hätten und keineswegs die darin vertretenen Positionen der bekannten Synbio-Akteure eins zu eins übernommen worden seien. Eine solche kritische Diskussion sollte nach Kaiser (2012) von der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung vorangetrieben werden. Es müsse die Selbstdarstellung der Synbio-Akteure hinterfragt werden. Weder der »Hype« dieser Technologie sei zu unterstützen noch die Versuche Einzelner, Risiken unangemessen heraufzubeschwören. Es sollte vielmehr untersucht werden, welche Grundwerte die Menschen hinsichtlich Technologie und Wissenschaft vertreten. Die Eurobarometerumfragen würden nur die aktuellen Einstellungen zu neuen Technologien u. Ä. abfragen, nicht aber die dahinter stehenden Werte tiefer gehend untersuchen.

Das Experiment von Kronberger et al. (2012) deutet auf einen möglichen Effekt einer gezielten öffentlichen Kommunikation hin, der in der Vergangenheit bereits bei anderen neuen Technologien (z. B. der Nanotechnologie; Kahan et al. 2009) beobachtet und in einem weiteren Experiment von Hart Research Associates (2013, S. 8) ebenfalls für die Synbio ganz ähnlich beschrieben wurde: Ein besserer, umfassenderer Informationsstand bewirkt nicht die Erhöhung der Akzeptanz, sondern

kann eine Verstärkung vorhandener Haltungen (in positiver und negativer Richtung) bewirken, je nachdem, welche z. B. kulturell oder sozial geprägten Voreinstellungen existieren. Eine intensive öffentliche Debatte führt somit nicht unbedingt zu einer größeren Ausdifferenzierung der Einstellungen gegenüber einer Technologie, auf jeden Fall weder automatisch zu mehr Zustimmung oder mehr Ablehnung. Dies spricht nicht gegen eine Beförderung der öffentlichen Debatte, aber für eine genaue Abstimmung entsprechender Maßnahmen auf die daran geknüpften Erwartungen.

## Strategien öffentlicher Kommunikation von Synbio 1.3

In der Begleitforschung wurde und wird die Intensivierung des öffentlichen Dialogs über die Synbio (wie bei allen NEST) schon fast routineartig gefordert (Kaiser 2012), und auch bei den politiknahen Stellungnahmen gehört ein entsprechendes Votum seit vielen Jahren dazu. Prominente internationale Beispiele sind die Gutachten der EGE (2009) und der PCSBI (2010a). Die PCSBI (2010a, S. 14 ff.) sprach von demokratischer Deliberation und rief Wissenschaft und Zivilgesellschaft zu einem respektvollen Dialog miteinander auf. Das Ziel müsse ein informierter und angemessener Diskurs sein, weswegen auch darauf geachtet werden sollte, effektvolle, aber wissenschaftlich unkorrekte Phrasen wie künstliches Leben ebenso zu vermeiden wie Gottesbezüge. Die EGE (2009, S. 55) wandte sich direkt an die Journalisten mit der Bitte, seriös und verantwortlich über die Synbio zu berichten.

Nach der gemeinsamen Stellungnahme mit DFG und Leopoldina zur Synbio (DFG et al. 2009) von 2010 bis 2012 führte acatech ein Projekt zu den Perspektiven der Biotechnologiekommunikation durch und schloss dieses mit einem Positionspapier ab (acatech 2012). Darin wurde betont, dass in Deutschland keine generelle (Gen-)Technikfeindlichkeit bestehe und dass der Grad der Informiertheit über eine neue Technologie nicht darüber entscheide, ob ihr seitens der Bürger zugestimmt werde oder nicht. Wie die Beispiele der Roten und Weißen Gentechnik zeigten, sei eine Mehrheit durchaus bereit, einer als nützlich empfundenen Technologie zuzustimmen. Im Falle der Grünen Gentechnik habe die Ablehnung in der deutschen Bevölkerung ihren Grund darin, dass in den Augen der Mehrheit die Risiken der Technologie ihren (Verbraucher-)Nutzen übersteigen würden. Auch das (fehlende) Vertrauen in die staatlichen Verbraucherschutzinstitutionen sowie kulturelle Grundüberzeugungen seien entscheidende Faktoren. Eine bloße Information der Öffentlichkeit über die Medien (Wissenschaftsmarketing) könne daher nicht zu einer besseren Akzeptanz neuer Technologien führen. Dies könne vielmehr auch den gegenteiligen Effekt haben und vorhandene skeptische Grundüberzeugungen verstärken (vgl. die Ergebnisse des Experiments von Kronberger et al. 2009 u. 2012 in Kap. V.1.2). Die acatech (2012) forderte daher von den Wissenschaftlern eine verstärkte Dialogbereitschaft mit der Öffentlichkeit. Hierzu müsse die Repräsentation der Wissenschaftler in den Medien professionalisiert werden, wobei auch neue webbasierte Diskussionsforen genutzt werden sollten. Andernfalls bestünde die Gefahr, dass die Synbio der Deutungshoheit von Umwelt-NRO überlassen werden, gerade angesichts gewisser Ähnlichkeiten mit der Grünen Gentechnik (acatech 2012, S. 4 f., 24 f. u. 29 ff., sowie genauer 36 ff.). Sowohl PCSBI (2010a) und EGE (2009) als auch acatech (2012) forderten somit nicht nur mehr, sondern vor allem einen angemesseneren Dialog zwischen Wissenschaft und Zivilgesellschaft. Es bleibt dabei zu klären, wie dieser gestaltet werden kann bzw. soll.

Eine analytische Strukturierung der bisherigen Strategieansätze bzw. Kommunikationstypen, welche von verschiedenen Akteuren in ihrer Kommunikation der Synbio verfolgt wurden, nahmen Torgersen/Schmidt (2012, S. 130 ff.) vor und identifizierten dabei sechs Varianten:

> »Dogma des kommenden Konfliktes«
> »Jugendliche (Technik-)Begeisterung«
> »Venterisierung« oder »Business Science«
> »Nachhaltige Geschäfte«
> »Business as usual« oder »Informing Science«
> »Kunst und Wissenschaft«

Auch wenn die Synbio bislang noch keine nennenswerten öffentlichen Kontroversen erzeugt habe, bestehe innerhalb der vorwiegend sozialwissenschaftlichen Begleitforschung ein »Dogma des kommenden Konfliktes«. Es werde vermutet, dass sich kommende Konflikte als Wertedebatte um den Lebensbegriff und als Risikodebatte formieren würden. Dementsprechend sei die Kommunikationsstrategie der Begleitforscher pro-aktiv und konfliktvermeidend. Die zitierten Empfehlungen der EGE (2009) und der PCSBI (2010a) sind hierfür ein markantes Beispiel. Torgersen/Schmidt (2012) verwiesen auf einen festen Katalog an möglichen Risiken, der in allen Analysen der Begleitforschung zu finden sei: Biosecurity, Biosafety, ethische Grundsatzfragen (»Leben schaffen«), aber auch sozioökonomische Folgen, insbesondere beim Schutz des geistigen Eigentums (Monopolbildung). Ein Teil dieser Risiken ist auch in der internationalen Presse aufgegriffen worden (Kap. V.1.1), Fragen der notwendigen Industriestandards und des geistigen Eigentums spielen in der Berichterstattung allerdings keine große Rolle. Torgersen/Schmidt (2012, S. 130 ff.) nehmen an, dass sich die Debatte dieser speziellen Fragen auch in Zukunft auf Fachkreise beschränken wird.

Ein Appell an »Jugendliche (Technik-)Begeisterung« sei vor allem im iGEM-Wettbewerb (Kap. VI) zu finden. Diese Kommunikationsweise ziele eher auf ein urbanes, elitäres, technik- und spaßaffines Publikum. Die »Venterisierung« der Wissenschaftskommunikation hingegen zeichne – neben einer starken Personenbezogenheit – die Vermischung von wissenschaftlichen und kommerziellen Interessen/Fragen aus. Besonderes Interesse liege bei diesem Typus auf der Patent- bzw. Open-Source-Frage. »Nachhaltige Geschäfte« würden die Vertreter eines weiteren Typus für sich beanspruchen, der sich durch einen besonderen philanthropischen Einschlag und »ökologische Public Relations« auszeichne. Hauptvertreter seien Jay Keasling und die Firma Amyris (Kap. III.3.5). Eine andere Gruppe von Wissenschaftlern sei darum bemüht, die Synbio der Öffentlichkeit in einem möglichst positiven Licht zu vermitteln, um so ein »Business as usual« sicherzustellen. Das eigentliche Ziel sei dabei, einem Störfeuer der Öffentlichkeit durch deren Informierung zuvorzukommen, was aber nicht mit einem echten Dialog zu verwechseln sei. Einen letzten Typus sehen Torgersen und Schmidt in der Verbindung von »Kunst und Wissenschaft«, etwa im kommunikativen Rahmen des BIO·FICTION Science Art Film Festivals.[54] Hier stünde in einer futuristischen, an den Cyberpunk angelehnten Grundstimmung vor allem die Darstellung der Synbio als Designtechnik im Vordergrund (Torgersen/Schmidt 2012, S. 132 ff.; Kap. VI.2).

54 Dieses Festival wurde vom Österreicher Markus Schmidt selbst maßgeblich organisiert. Nach dem ersten Festival im Jahr 2011 in Wien wurde im Oktober 2014 ein weiteres Festival durchgeführt, bei dem neben Filmen auch Biokunst, DIY-Biologie und Ergebnisse der Begleitforschung präsentiert wurden.

Die Akteurstypen nach Torgersen/Schmidt (2012) interpretieren die Synbio teilweise sehr verschieden. Es gibt genauso wenig eine einheitliche Definition der Synbio wie in der dargestellten Presseberichterstattung. Nach Torgersen/Schmidt (2012) tendieren die organisierten Akteure dazu, die Synbio wahlweise als Fortführung/Weiterentwicklung der Gen-, der Nano- oder der Informationstechnologie zu deuten. Dies sei Teil der jeweiligen Kommunikationsstrategie. So würden Analogien zur Nanotechnologie eher von Vertretern der Forschungsförderung gesucht, um die Notwendigkeit von antizipativer Begleitforschung zur Absicherung eines (kommerziell) vielversprechenden Forschungszweigs zu untermauern. Einzelne Umwelt-NRO wie die ETC Group würden die Synbio als Teil der Grünen Gentechnik darstellen, um die Synbio in ihre Kampagne (»extreme genetic engineering«) einzubauen (ETC 2007). Wissenschaftler (wie z. B. Drew Endy) würden schließlich eher die Analogien zur Informationstechnologie aufzeigen, um von der breiten öffentlichen Unterstützung dieser Technologie zu profitieren (Torgersen/Schmidt 2012, S. 136 f.).

In Deutschland ist bislang keine der großen Umwelt-NRO intensiver auf die Synbio eingegangen – und das, obwohl bereits bei einem frühen internationalen Appell im Jahr 2006, der von der ETC Group initiiert wurde, auch mehrere deutsche NRO beteiligt waren (Stemerding et al. 2009, S. 172 ff.). Auf den Webseiten von Naturschutzbund Deutschland (NABU), Greenpeace und Bund für Umwelt und Naturschutz e. V. (BUND) lassen sich praktisch keine Verweise finden. Die einzige explizit kritische Stimme in Deutschland ist die Organisation Testbiotech e. V., welche vom ehemaligen Greenpeacemitarbeiter Christoph Then betrieben wird und 2010 zwei Analysen/Stellungnahmen zur Synbio online publiziert hat (Testbiotech 2010a u. 2010b). Das Onlineportal »keine-gentechnik.de«, das von mehreren gentechnikkritischen Verbänden betrieben wird, liefert in einem Dossier sowohl Hintergrundinformationen als auch aktuelle Nachrichten zur Synbio.[55] Daneben haben sich Vertreter des BUND mehrfach in Diskussionsveranstaltungen eingebracht (u. a. bei der Tagung »Werkstatt Leben« des Deutschen Ethikrates in Mannheim 2011, bei Workshops des SynbioTA-Projekts in Bremen 2012 und im Rahmen der Tagung »S.Net« in Karlsruhe 2014). Keiner dieser Akteure besitzt jedoch eine hervorgehobene Präsenz in der Medienberichterstattung über die Synbio (Lehmkuhl 2011, S. 35 f.).

Dass es den Opponenten der Synbio an Angriffsfläche und Mobilisierungspotenzial zu mangeln scheint, erklärten Torgersen/Schmidt (2012) teilweise damit, dass die Kommunikationsstrategie der Umwelt-NRO angesichts der veränderten gesellschaftlichen Umstände weniger erfolgversprechend sei als in den 1990er Jahren. So seien heutzutage die Bürger nicht nur allgemein besser mit neuen Technologien wie Computern oder Solaranlagen vertraut, auch das ökonomische Potenzial einer neuen Technologie sei in Zeiten der Wirtschafts- und einer sich abzeichnenden Energiekrise ein schlagkräftiges Argument (Torgersen/Schmidt 2012, S. 129). Allerdings ist auch zu beobachten, dass große Teile der Umweltbewegung in Deutschland ab etwa der zweiten Hälfte der 1990er Jahre in ihrer Haltung gegenüber der Gentechnik differenzieren zwischen der Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen einerseits und der Nutzung der Gentechnik in geschlossenen Systemen andererseits. Während erstere stark kritisiert wird, gilt letztere als unproblematisch und wird von Umwelt-NRO (vgl. etwa Schmitt 2011) und beispielsweise auch der Partei der Grünen seit Langem nicht infrage gestellt.

Reichow/Bowman (2015) wiesen am Beispiel der Nanotechnologiedebatte in Deutschland darauf hin, dass NRO im Lauf der Zeit das Interesse an einer Beteiligung an der Diskussion über Risiken

55 www.keine-gentechnik.de/dossiers/synthetische-biologie.html (23.11.2015)

und Regulierung verlören. Als Grund dafür nannten Reichow/Bowman (2015), dass diese von der Umsetzung der Empfehlungen, an denen sie bereits früh mitgearbeitet hatten, enttäuscht waren und dass die öffentliche Einschätzung der Nanotechnologie als »überwiegend nützlich« einer Mobilisierung breiterer Gruppen der Bevölkerung entgegenstand. In Anbetracht der geringen Bekanntheit der Synbio in der Bevölkerung lässt sich auch für die Synbio von einem geringen Mobilisierungsgrad ausgehen. In Kommentaren zum Vortrag von Reichow/Bowman (2015) wiesen Vertreter von NRO außerdem darauf hin, dass ihre Organisationen nicht genügend Ressourcen hätten, auf den unterschiedlichen Feldern neuer, emergierender Technologien jeweils kompetent und engagiert mitzuwirken (pers. Kommunikation im Rahmen der S.Net 2014-Konferenz in Karlsruhe; Steffen Albrecht).

Beide Befunde werden durch eine Studie von Stemerding et al. (2009) bestätigt, in der NRO zu ihrem Engagement beim Thema Synbio befragt wurden. Stemerding et al. (2009) identifizierten neben Vorreitern wie der ETC Group eine ganze Reihe von NRO im internationalen Feld, darunter auch deutsche. Allerdings würden diese zunächst das Feld beobachten und sich eine Meinung bilden. Für eine aktive Mobilisierung sei die Synbio noch zu weit von den Zielgruppen der NRO, den Bürgern bzw. Verbrauchern entfernt. Vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen seien sie daher (noch) nicht zu einem verstärkten Engagement in der öffentlichen Diskussion über Synbio bereit. Auch Stemerding et al. (2009) betonten, dass ein solches Engagement zu einem frühen Zeitpunkt jedoch wünschenswert sei, um neben der wissenschaftlichen und Governanceperspektive auch weitere gesellschaftliche Positionen bereits im »frühen« Diskurs über die Synbio in möglichst großer Breite berücksichtigen zu können.

Balmer/Herreman (2009, S. 220) hielten eine angemessene Kommunikation dann für gewährleistet, wenn die verantwortlichen Wissenschaftler sich frühzeitig mit der Öffentlichkeit über ihre Forschungen austauschen, ohne deren Bedeutung zu übertreiben (»must not be over-hyped«). Kritiker der Forschung wiederum sollten die Risiken der Synbio nicht übertreiben, sodass im Ergebnis eine »realistische« Diskussion geführt werden könne, auch um die Notwendigkeit einer zusätzlichen Regulierung abschätzen zu können. Torgersen/Schmidt (2012, S. 138 f.) merkten dazu an, dass der jetzige projektorientierte Charakter des Wissenschaftsbetriebs allerdings wenig dazu geeignet sei, eine »realistische« Kommunikation zu verfolgen. Wissenschaftler seien darauf angewiesen, ihre Ergebnisse zu vermarkten, weswegen der »Hype« von neuen Technologien wie der Synbio quasi zum Geschäft gehöre. Dieser Vermarktungszwang gelte freilich auch für die organisierten Kritiker der Synbio (Stichwort »Hypegesellschaft«). Diese hätten im Fall der Synbio das Problem, ihre eigenen Horrorszenarien über die konventionelle Gentechnik noch einmal übertreffen zu müssen, um überhaupt neue Aufmerksamkeit zu generieren. Dass sie hierbei überhaupt auf Erfolg hoffen könnten, liege vor allem an der hohen und ambivalenten Medienresonanz Craig Venters.

Auch wenn Torgersen/Schmidt (2012) skeptisch gegenüber einer Ein-Weg- wie auch einer (partizipativen) Zwei-Wege-Kommunikation sind, plädieren sie grundsätzlich für einen Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft. Auch wenn eine Informierung der Bürger (mit dem Ziel eines »public understanding of science«) allein nicht ausreiche, so sei dies dennoch eine notwendige Basis für jeden Dialog und eine sachliche Debatte. Partizipative Verfahren sollten genutzt werden, auch wenn sie kein Wundermittel darstellten und ihrerseits neben Stärken auch Schwächen hätten – vor allem das Risiko einer inhaltlichen und legitimatorischen Überforderung. Werde man erst aktiv, wenn erste Anwendungen auf dem Markt seien, dann könne ein Dialog schlimmstenfalls zu einem

bloßen Akzeptanzbeschaffungsprozess verkommen und bestenfalls noch eine »Informationsveranstaltung der gehobenen Art« für ein interessiertes Publikum sein. Wenn aber ein Dialog zu früh gesucht werde, könne dieser schlicht sinnlos sein, weil noch nicht klar sei, worüber man eigentlich debattieren solle. Dieses Kommunikationsproblem der Synbio ist eine Erscheinungsform des Collingridge-Dilemmas TA (Collingridge 1980). Dieses steht synonym für die Grundproblematik einer Folgenbetrachtung zwischen den Polen einer hochgradig unsicheren Wissenslage in frühen Phasen der Technologieentwicklung (weshalb kaum konkrete Einschätzungen zum Nutzen- und Risikopotenzial getroffen werden können) und einer geringen Gestaltungswirkung in späten Phasen, wenn die Produkte und Verfahren bereits in der Anwendung sind und höchstens noch graduelle Rahmensetzungen möglich sind.

Torgersen/Schmidt (2012, S. 141 ff.) riefen daher dazu auf, immer im Einzelfall zu prüfen, was die Vor- und Nachteile sowie Kommunikationsziele eines partizipativen Verfahrens sein könnten und sollten. Ziele können in Abhängigkeit von den Interessen der beteiligten Akteure z. B. sein (Torgersen/Schmidt 2012, S. 139 ff.):

> die Steigerung der Akzeptanz einer Technologie,
> die Vermeidung von ökonomischen Einbußen und Standortnachteilen,
> die (antizipative) gesellschaftliche Konfliktvermeidung,
> die Förderung technologischer Innovation,
> die politische Einbettung der Technologie in eine Gesellschaft informierter »Citoyens« oder
> die Verbesserung der Technik über eine Identifizierung gesellschaftlicher Bedürfnisse (»responsible innovation«, »constructive technology assessment«).

Ergänzend lassen sich als weitere mögliche Ziele nennen:

> die Identifizierung (und Vermeidung bzw. Verminderung) möglicher Risiken einer Technologie,
> das »Empowerment« der Beteiligten gegenüber anderen Akteuren im Prozess der Technologieentwicklung,
> die Schaffung von Räumen zur wechselseitigen Diskussion unterschiedlicher Stakeholder über die Folgen von Technologien (BBSRC et al. 2010, S. 15),
> Wissenschaftler und wissenschaftspolitische Akteure an die Bedürfnisse, Meinungen und das Verständnis der Bevölkerung rückzukoppeln (acatech 2012, S. 37 f.).

Torgersen (2009, S. 12) wies bereits an früherer Stelle darauf hin, dass Dialogverfahren nur dann einen legitimierenden Einfluss haben können, wenn die beteiligten Bürger eigenständig festsetzen können, welche Themen, Probleme und Risiken debattiert würden, und nicht andere dies für sie übernähmen.

## Begleitforschung und Diskursförderung als Governance der Synbio 2.

Während die deutsche Öffentlichkeit die Synbio bis zum heutigen Tag nicht in bedeutendem Umfang als Thema aufgegriffen hat, zeigt sich in Bezug auf die sozialwissenschaftliche Begleitforschung ein umgekehrtes Bild. Bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Technologieentwicklung setzte die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit ihren möglichen Folgen ein. Aktivitäten der Begleitforschung wurden in mehreren Ländern institutionalisiert, beispielsweise im Vereinigten

Königreich in Form einer engen Zusammenarbeit von Synbio-Forschern und Sozialwissenschaftlern[56] (Kap. V.2.2), in den USA in Form eines eigenen Schwerpunkts innerhalb von Synberc[57] sowie auf europäischer Ebene durch die Ausschreibung für Forschung im Bereich Synthetischer Biologie im Rahmen des Horizont-2020-Forschungsprogramms, in dem jeder Projektantrag auch ein Teilprojekt zu Fragen der verantwortlichen Forschung und Entwicklung beinhalten soll (Näheres in Kap. V.2.5). Außerdem wurden konzeptuell neue Ansätze der Begleitforschung und der Governance von Technologien entwickelt, um den Herausforderungen einer frühzeitigen gesellschaftlichen Begleitung der Synbio zu begegnen.

## TA als Begleitforschung in Frühstadien der Technikentwicklung 2.1

Die im jetzigen Frühstadium noch sehr offene Entwicklung der Synbio stellt die Begleitforschung insbesondere vor das beschriebene (Collingridge-)Dilemma. Demnach sind zwar in einer frühen Phase der Technologieentwicklung die Möglichkeiten des gestaltenden Eingriffs (theoretisch) am größten, das Wissen über die möglichen Folgen und damit die Notwendigkeiten von Eingriffen ist aber gering und unsicher. In späten Phasen der Technologieentwicklung lassen sich umgekehrt die Folgen zwar mit größerer Gewissheit abschätzen, dann aber sind viele Gestaltungsfragen bereits entschieden und Änderungen der Entwicklung erfordern einen ungleich größeren Aufwand. Darüber hinaus gilt die Synbio als ein Feld, das sich weder klar der Wissenschaft noch der Technologie zuordnen lässt. Als hochgradig dynamisch und noch recht weit von konkreter Anwendung entfernt, gleichzeitig aber wesentlich auf diese ausgerichtet (sieht man von einigen Ansätzen der Bottom-up-Synbio ab, die sich klar der Grundlagenforschung zuordnen lassen), spielen mögliche Verwertungszusammenhänge eine große Rolle bereits im Forschungsprozess (Liebert/Schmidt 2010, S. 115).

Neben klassischen Ansätzen der TA, die auf die Erfassung und Bewertung der wissenschaftlichen und sozioökonomischen Potenziale sowie der ethischen, juristischen und gesellschaftlichen Folgen der Synbio zielen (»ethical, legal, and societal implications« [ELSI]), wurden daher im Kontext der Synbio auch Verfahren einer partizipativen TA durchgeführt und es wurde begonnen, die Entwicklung der Synbio im Sinne des RRI-Konzepts mitzugestalten. Partizipative TA versucht, die Forderung nach einer Einbeziehung unterschiedlicher Stakeholder bereits bei der Durchführung der TA umzusetzen (TAB 2004). Mit Verfahren wie Konsensuskonferenzen, Fokusgruppen oder Mediationsverfahren werden Einstellungen und Sichtweisen von Akteuren erhoben, die üblicherweise weder von institutioneller noch von politischer Seite aus in den Technikentwicklungsprozess einbezogen sind. Auf diese Weise soll nicht nur die Legitimität von Governancemaßnahmen erhöht werden, sondern auch zusätzliches Wissen und ein umfassenderes Verständnis der Wertvorstellungen in der Bevölkerung gewonnen werden (Grunwald 2002, S. 128 f.). Der Ansatz der RRI (Kap. V.2.4) verschiebt demgegenüber den Fokus der TA weiter in Richtung auf möglichst frühe Phasen der Technikentwicklung. So wird versucht, Akteure aus Wissenschaft, Forschung und Entwicklung frühzeitig in einen Austausch mit anderen gesellschaftlichen Akteuren über Fragen der ethischen und gesellschaftlichen Ziele und Folgen ihrer Arbeit zu bringen.

56 www3.imperial.ac.uk/syntheticbiology/research; www.synbio.group.shef.ac.uk/synbio/projects (23.11.2015)
57 www.synberc.org/policy-and-practices (23.11.2015)

Auch die von Grunwald (2012) vorgeschlagene hermeneutische TA setzt möglichst früh im Entwicklungsprozess ein, beschränkt sich dabei aber auf eine hermeneutische, also auf Sinnverstehen abzielende Analyse der Visionen und Denkfiguren des Diskurses um die Synbio. Im Gegensatz zur »constructive TA« (Schot/Rip 1997) richtet sich hermeneutische TA nicht in erster Linie auf die Gestaltung der Technologien selbst, sondern auf eine »Selbstaufklärung« der Diskussion um neue Technologien (Grunwald 2014b, S. 12). Ein Bezugspunkt sind die Erfahrungen aus der Nanotechnologiedebatte, bei der es trotz frühzeitig einsetzender Begleitforschung letztlich nur in geringem Maße gelungen sei, tatsächlichen Einfluss auf die Gestaltung zu nehmen (Grunwald 2012, S. 12). Als Alternative schlug Grunwald (2012) vor, nicht (zukünftige) Technik gestalten zu wollen, sondern (gegenwärtige) Forschungsprozesse sowie (gegenwärtige) Debatten. Für die Gestaltung von Forschungsprozessen sei keine in die ferne Zukunft weisende prospektive Analyse nötig, sondern diese könnte bereits durch Konfrontation mit Sorgen bezüglich Biosafety und Biosecurity (Kap. IV) bereichert werden. Zur Debatte über Synbio lasse sich beitragen, indem die darin geäußerten Visionen und Zukünfte einer ebenso hermeneutischen wie kritischen Analyse unterzogen werden und die Ergebnisse wieder in den Diskurs eingespeist werden. Hermeneutische TA meint insofern zum einen eine Selbstaufklärung der Debatten über sich selbst, zum anderen ein »Vision Assessment«, das »technikbasierte Visionen in ihren kognitiven und evaluativen Gehalten und in Bezug auf ihre Folgen« untersucht (Grunwald 2012, S. 14) – auch dies mit Blick auf die Stimulierung des Diskurses zwischen Experten, Forschungsförderungs- und Regulierungsinstitutionen und anderen Stakeholdern.

Die hermeneutische TA bewegt sich in Sichtweite sozialwissenschaftlicher Forschungsansätze wie etwa den Science and Technologie Studies (STS) oder ELSI-Studien zu neuen Technologien. Sie sieht aber ab von der direkten Untersuchung der Folgen von Technologien, die so neu sind, dass sich weder Prognosen noch Szenarien sinnvoll erstellen lassen (Grunwald 2014b). Im Gegensatz zu den grundlagenfokussierten STS und ELSI-A ist sie explizit interdisziplinär und anwendungsorientiert ausgerichtet (Torgersen 2013, S. 79). Viele Fragen der konkreten Durchführung einer hermeneutischen TA sind allerdings noch nicht geklärt, ebenso die Frage, wie die Verbindung zum RRI-Konzept aussehen kann (Grunwald 2012, S. 13).

## Diskursaktivitäten zur Synthetischen Biologie als Element der Forschungspolitik 2.2

Während die hermeneutische TA einen in erster Linie analytischen Charakter hat, beziehen Verfahren der partizipativen TA unterschiedliche gesellschaftliche Stakeholder aktiv in die Bewertung der Synbio ein. Anstöße dazu kommen zum einen aus der Forschung bzw. der Forschungspolitik, die aus verschiedenen Gründen einen breiten gesellschaftlichen Dialog fordern. Sie ergeben sich aber auch aus gesellschaftlichen Entwicklungen wie dem zunehmenden Interesse für Wissenschaft als Innovationsfaktor, aber auch Misstrauen in die wissenschaftliche Leistungsfähigkeit. Auch das Verschwimmen der Grenze zwischen Grundlagen- und angewandter Forschung (Jasanoff 2003) und eine wachsende Unsicherheit bezüglich der Folgen, die sich aus den ebenfalls wachsenden technologischen Fähigkeiten ergeben (Hennen/Pfersdorf 2014), tragen zur stärkeren Orientierung der TA auf gesellschaftliche Stakeholder bei. Die Diskursaktivitäten sind in den meisten Fällen eingebettet

in die staatliche Forschungspolitik zur Synbio, da die Öffentlichkeit und zivilgesellschaftliche Organisationen in den betrachteten Ländern ihr Interesse bisher nur in geringem Maße auf die Synbio richten und daher wenig Engagement von dieser Seite ausgeht.

Die bislang vielfältigsten Aktivitäten zur Einbeziehung der Öffentlichkeit in den Diskurs zur Synthetischen Biologie in Europa, wenn nicht weltweit, sind in den Niederlanden sowie im Vereinigten Königreich zu beobachten. In den Niederlanden (Kap. V.2.3) spielte dabei das Rathenau-Instituut, Pendant des TAB (allerdings mit anderer Konzeption und abweichendem Zuschnitt der Aufgabenstellung; TAB-Brief 41, S. 50 ff.) und wie dieses EPTA-Netzwerkmitglied, eine zentrale Rolle. In Großbritannien (Kap. V.2.4) erfolgt eine umfassende Förderung durch die Regierung. Die Situation in Deutschland ist durch ein Nebeneinander der Aktivitäten unterschiedlicher Akteure geprägt, eine besondere Rolle bei der Einbeziehung der Öffentlichkeit spielt hier die Begleitforschung. Dabei steht die Information der Öffentlichkeit im Vordergrund, stärker partizipative Aktivitäten gibt es bislang kaum (Kap. V.2.5). Auf europäischer Ebene spielt die Europäische Kommission (insbesondere die Generaldirektion für Forschung und Innovation, aber auch die wissenschaftlichen Ausschüsse) eine zentrale Rolle. Sie füllt diese Rolle aber vor allem als Moderatorin der Aktivitäten europäischer Akteure aus, besonders im Rahmen des neuen Konzepts verantwortungsvoller Forschung und Innovation (RRI) (Kap. V.2.6 u. V.2.7).

## Niederlande 2.3

Das Rathenau-Instituut publizierte erstmals 2006 eine Stellungnahme zur Synbio und befasst sich seitdem kontinuierlich mit dem Thema. Hierbei arbeitete es u. a. mit dem WWICS zusammen.[58] Das Rathenau-Instituut beteiligte sich an mehreren internationalen ELSI-Projekten zum Thema Synbio: »Synthetic Biology for Human Health (SYBHEL), »Global Ethics in Science and Technology« (GEST), »Making Perfect Life« sowie aktuell »SYNENERGENE« (Kap. V.2.6 u. V.2.7). Ferner arbeitet das Institut mit der COGEM (vergleichbar der deutschen ZKBS; Kap. IV.1.1) zusammen und brachte im Jahr 2011 Wissenschaftler und Risikoanalysten in einem Workshop zusammen.[59] In insgesamt elf Publikationen hat das Rathenau-Instituut seither unterschiedliche Aspekte der Synbio betrachtet, u. a. mit Berichten zu öffentlichen Diskussionsveranstaltungen wie dem »Meeting of Young Minds« sowie zur Debatte über die Synbio in vier verschiedenen Ländern.[60]

Entsprechend dem Fokus des Instituts auf die Bereicherung und Anregung öffentlicher Debatten wurden neben Expertenworkshops auch mehrere öffentliche Veranstaltungen zur Synthetischen Biologie durchgeführt. In den Jahren 2012 und 2013 war Synbio Thema von »politischen Cafés«, d. h. informellen, offenen Diskussionsveranstaltungen in Den Haag. Im September 2011 wurde außerdem ein »Meeting of Young Minds« durchgeführt (und 2012 in ähnlicher Form wiederholt). Bei dieser Podiumsdiskussion waren sechs junge Wissenschaftler[61] vertreten, die sich im Rahmen ihres Studiums und des iGEM-Wettbewerbs eingehender mit der Synbio beschäftigt hatten, außerdem

58 Dieses unabhängige, durch die US-Regierung und private Mittel getragene Forschungszentrum bearbeitet neben Fragen der internationalen Beziehungen auch verschiedene Fragestellungen der Technikfolgenabschätzung. Seit 2008 wird die Synbio in einem eigenen Projekt untersucht (www.synbioproject.org; 23.11.2015).

59 www.cogem.net/index.cfm/nl/uitgelicht/item/synthetische-biologie--update-2013 (23.11.2015)

60 www.rathenau.nl/en/themes/theme/project/synthetic-biology.html (23.11.2015); die Berichte sind nur zum Teil auf Englisch publiziert worden.

61 Mit Paul Kaufman und Rüdiger Trojok waren 2011 auch zwei Deutsche Teilnehmer der Diskussion.

sechs niederländische Jungpolitiker, wobei fast alle größeren Parteien vertreten waren. Es sollten die »Synthetischen Biologen der Zukunft« mit »niederländischen Politikern der Zukunft« zusammengebracht werden. Grundlage der Debatte waren neben einem »JumpStart Meeting«, in dem sich die Teilnehmer mit der wissenschaftlichen Seite der Synbio über Laborbesuche u. Ä. vertraut machen konnten, die »SynBio Futures«. Dabei handelt es sich um Kurzgeschichten zu möglichen Zukunftsszenarien der Synbio, die den Zusammenhang von technischen Anwendungen und ihren gesellschaftlichen Folgen deutlich machen sollen. 17 dieser sogenannten »technomoralischen Vignetten« wurden von Mitarbeitern und Studenten der Universitäten Maastricht und Twente erstellt (Kasten V.1). Da alle Teilnehmer im Vorfeld über die wissenschaftliche Seite der Synbio aufgeklärt wurden, konnten sie sich während der Debatte auf die gesellschaftlichen Aspekte der Zukunftsszenarien konzentrieren. Das Publikum bestand vorwiegend aus Studenten der Universität Amsterdam, da die Debatte im dortigen Auditorium abgehalten wurde. Die Mitarbeiter des Rathenau-Instituuts sahen, dass der Charakter dieser Podiumsdiskussion sehr akademisch war, sie hielten jedoch eine Ausweitung der Debatte nicht nur, aber auch auf politische oder religiöse NRO für möglich und wünschenswert (Rerimassie/Stemerding 2012, S. 14 f.).

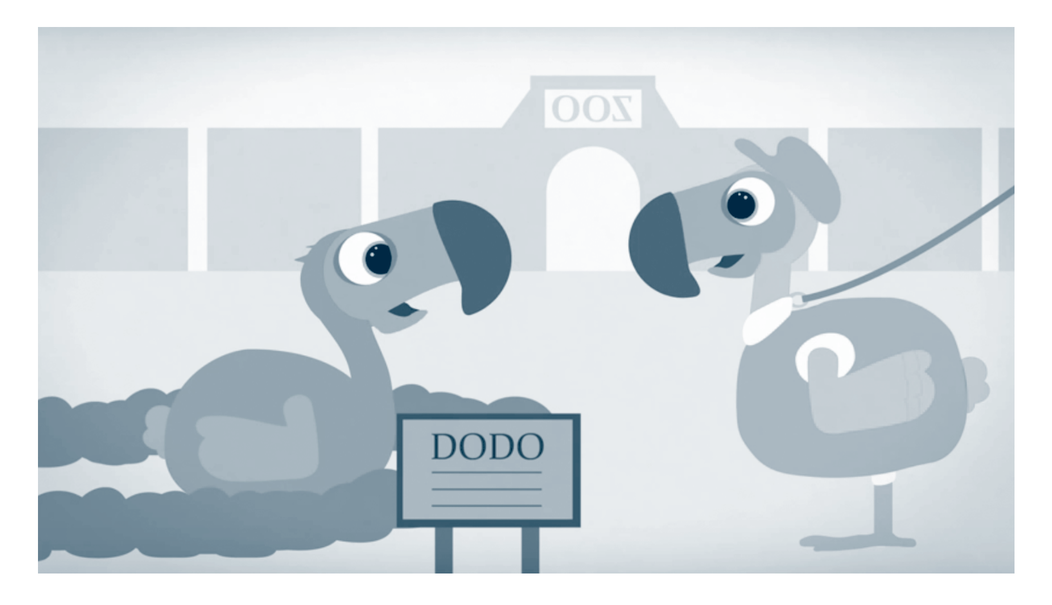
**KASTEN V.1: MATERIALIEN ZUR ÖFFENTLICHEN VERMITTLUNG DER SYNBIO (1): »SYNBIO FUTURES« ALS TECHNOMORALISCHE VIGNETTEN DES RATHENAU-INSTITUUTS**

Bei den SynBio-Futures-Szenarien werden auf jeweils ein bis zwei Seiten verschiedene hypothetische Anwendungen der Synbio beschrieben, deren nützliche und schädliche gesellschaftliche Folgen in einen Zusammenhang miteinander gebracht werden. Die Szenarien erzählen Geschichten, die bewusst alltagsnah gehalten sind, aber nicht den Anspruch erheben, korrekte Prognosen abzugeben. Zu den angesprochenen Themen zählen u. a. künstlich gesteigerte Biolumineszenz, Biosicherheit, Biotreibstoffe, futuristische Arzneimittel sowie die Wiedererschaffung ausgestorbener Tierarten.

Einige der Szenarien wurden in Form von kurzen Videoclips filmisch umgesetzt (Abb. V.3), andere nur in Textform. Alle Szenarien stehen im Internet zum Download bereit. Einzelne i-GEM-Teams beteiligten sich an der Erstellung der Szenarien. Eine Verwendung der Szenarien über den Zweck der Information über mögliche Anwendungen der Synbio hinaus findet seit Ende 2014 im Rahmen der öffentlichen Onlinediskussionen auf dem Wissenschaftsportal »Kennislink.nl« statt, wo die Szenarien als Stimulans der Diskussion dienen. Außerdem sollen sie Bildungseinrichtungen als Schulungsmaterialien zur Verfügung gestellt werden.

Quelle: www.rathenau.nl/en/themes/theme/project/synthetic-biology/synbio-futures.html (16.04.2015)

ABB. V.3 VIDEOCLIP ZUM SZENARIO »REINVENTING THE DODO«




Quelle: www.rathenau.nl/nl/page/synthetische-biologie (30.11.2015)

Dennoch scheint diese spezielle Form der Podiumsdiskussion einige typische Schwierigkeiten von partizipativer TA vermieden zu haben. So wurde durch das gezielte Ansprechen von jungen, an Gesellschaft und Technik interessierten Menschen und die folgende wissenschaftliche Begleitung der Teilnehmer das Problem gelöst, wie Laien für eine intensive und seriöse Auseinandersetzung mit dem Thema Synbio motiviert werden können. Die Jungpolitiker sind keine Mandatsträger und verfügen somit auch nicht über eine besondere demokratische Legitimation, stattdessen ist zu vermuten, dass sie in ihrem weiteren Berufsweg von ihrer persönlichen Auseinandersetzung mit der Synbio profitieren und in ihrem (politischen) Umfeld eine Multiplikatorenfunktion einnehmen werden. Auf diese Weise können sie auch nach der Podiumsdiskussion dazu beitragen, dass die Gesellschaft für das Thema Synbio sensibilisiert wird. Die Mitarbeiter des Rathenau-Instituuts plädierten dafür, die ethischen und sozialen Folgen der Synbio insgesamt stärker zu debattieren, da dies auch das Hauptanliegen der Diskussionsteilnehmer gewesen sei (Rerimassie/Stemerding 2012, S. 63 ff.). Die »SynBio Futures« erscheinen hilfreich, um weitere Debatten anzustoßen, da sie eine sehr breite Auswahl an möglichen Themen mit gesellschaftlicher Relevanz bieten. Welches der dort beschriebenen Zukunftsszenarien der Synbio die jeweiligen Teilnehmer näher besprechen, kritisieren und ausbauen wollen, kann ihnen selbst überlassen werden. Falls zukünftige wissenschaftliche Fortschritte es notwendig machen sollten, könnten beliebig viele weitere Szenarien entworfen oder überholte herausgenommen werden. Insofern ist dieses Hilfsmittel nicht nur inhaltlich (auch für Laien) informativ, sondern auch sehr flexibel.

Ein weiteres Beispiel für die öffentliche Diskussion der Synbio in den Niederlanden ist eine Ausstrahlung der einflussreichen Talksendung »Buitenhof« am 23. März 2008. Dort kam neben Wissenschaftlern auch der Direktor des Rathenau-Instituuts, Jan Staman, zu Wort. Im Rahmen von »SYNENERGENE« arbeitet das Rathenau-Instituut weiterhin mit iGEM-Teams (Kap. II.2.2) zusammen und unterstützt diese bei der Bearbeitung von ethischen und sozialen Fragestellungen im

Rahmen der jeweiligen Wettbewerbsprojekte. Im Jahrgang 2014 wurden insgesamt acht Teams unterstützt, außerdem führten Mitarbeiter des Rathenau-Instituuts bei der Abschlussveranstaltung des iGEM-Wettbewerbs mehrere Workshops zu den »SynBio Futures« durch.[62]

Ebenfalls im Rahmen von »SYNENERGENE« veröffentlichte Ende 2014 das vom niederländischen Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen (OCW) geförderte Wissenschaftsportal »Kennislink.nl« ein umfangreiches Bulletin zur Synbio in Zusammenarbeit mit dem Rathenau-Instituut und weiteren Institutionen der Wissenschaftsvermittlung.[63] Neben einführenden und Hintergrundartikeln werden auf der Website auch drei Diskussionsforen angeboten, die jeweils eines der SynBio-Futures-Szenarien, umgesetzt in Form kurzer Videoclips, als Diskussionsanreiz benutzen: leuchtende Pflanzen, Verhinderung menschlichen Alterns und Manipulation von Darmbakterien. Die Resonanz darauf liegt bisher bei zwischen 12 und 21 Stellungnahmen auf die jeweiligen Diskussionsfragen, wobei die Frage des Alterns am häufigsten kommentiert wurde (Stand April 2015).

## Vereinigtes Königreich 2.4

In Großbritannien wurde der Synbio vonseiten der Regierung eine besondere Bedeutung als Zukunftstechnologie für die wissenschaftliche und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des Landes zugemessen. Synbio wird als eine von acht »great technologies« genannt, auf die sich öffentliche Investitionen in Forschung und Entwicklung konzentrieren sollen (Willets 2013). Bereits früh wurden nicht nur individuelle Forschungsprojekte gefördert, sondern die Aktivitäten der unterschiedlichen Research Councils (fünf der insgesamt sieben Research Councils förderten bislang Synbio-Projekte) zusammengeführt und eine umfassende Strategie der Zusammenarbeit von Forschung und Industrie in Form einer Roadmap entwickelt und umgesetzt.

In einer Stellungnahme zur Synbio empfahl die Royal Academy of Engineering (RAE 2009a) u. a. die stärkere und kontinuierliche Einbeziehung der Öffentlichkeit von einem frühen Stadium der Entwicklung der Synbio an. Deren Ergebnisse sollten genutzt werden, um die Forschung und Entwicklung besser auf die gesellschaftlichen Anforderungen und Bedenken anzupassen. Im Zuge der Bearbeitung des Themas führte die Akademie in Zusammenarbeit mit der Agentur People Science and Policy Ltd. im Frühjahr 2009 erste Dialogveranstaltungen durch. Das Ziel dieser Fokusgruppendiskussion war in erster Linie die explorative Erhebung von Wahrnehmungen und Meinungen der Bevölkerung zur Synbio ohne Anspruch auf Repräsentativität. Dafür wurden 16 Teilnehmer unterschiedlicher Alters-, Geschlechts-, sozialer und ethnischer Gruppen zu zwei Treffen mit jeweils drei Stunden Dauer eingeladen. Ergänzend wurde eine repräsentative Telefonbefragung der britischen Bevölkerung zur Synbio durchgeführt (RAE 2009b).

Die Teilnehmer der Diskussionen hatten vorab keine Kenntnisse über Synbio und wurden in das Thema eingeführt. Sie zeigten sich grundsätzlich aufgeschlossen gegenüber der Synbio, machten aber gegenüber einer Freisetzung von entsprechenden Organismen geltend, dass dafür zu wenig über mögliche negative Konsequenzen bekannt sei. Zum Teil wurden entsprechende Bedenken auch in Bezug auf medizinische Anwendungen geäußert, wohingegen eine Anwendung in geschlossenen

62 http://synenergene.eu/event/igem-jamboree-workshop-looking-ahead (23.11.2015)

63 www.kennislink.nl/thema/synthetische-biologie (23.11.2015); das Portal kennislink.nl gibt an, monatlich insgesamt mehr als 350.000 Besucher zu zählen.

Systemen wie bei der Erzeugung von Biokraftstoffen durch Bakterien nicht kritisch gesehen wurde. Die Teilnehmer äußerten auch ihr grundlegendes Vertrauen, dass staatliche Stellen angemessene Formen der Regulierung der Synbio finden. Sie schlugen eine stärkere Information und Einbindung der Öffentlichkeit vor, waren aber skeptisch, inwieweit die Medien informativ und objektiv über die Synbio berichten.

**»PUBLIC DIALOGUE« ZUM THEMA SYNBIO**

Während diese Dialogveranstaltungen in erster Linie als explorative Meinungsforschung zu betrachten sind, ging der »Synthetic Biology Dialogue« des Biotechnology and Biological Sciences Research Council (BBSRC) und des Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) einen Schritt weiter in Richtung partizipativer TA durch Einbeziehung von mehr Teilnehmern und stärkerer Ausrichtung auf einen Dialog zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit.[64] Unterstützt von Sciencewise-Expert Resource Centre (Sciencewise-ERC), einer öffentlich finanzierten Einrichtung zur Förderung von »public engagement« in Großbritannien, luden die Research Councils in der ersten Jahreshälfte 2010 insgesamt 160 Laien, Wissenschaftler und weitere Stakeholder zu Workshops an verschiedenen Orten in Großbritannien ein. Die Workshops dauerten jeweils zwischen 2,5 und 5,5 Stunden und bauten inhaltlich aufeinander auf. Ergänzend wurden insgesamt 41 qualitative Interviews mit Stakeholdern geführt. Die Gesamtkosten des Dialogs beliefen sich auf knapp 300.000 britische Pfund, nebst weiteren 40.000 britischen Pfund für die wissenschaftliche Begleitung und Evaluation des Dialogs. Diese Kosten wurden vom Department for Business Innovation and Skills (BIS) getragen, dem britischen Ministerium für Wirtschaft und Forschung. Die Evaluation wurde extern von den Laura Grant Associates 2011 durchgeführt, um den »Impact« des Dialogs auf die weitere öffentliche Förderung der Synbio zu messen. Grant et al. (2011) stellten fest, dass der beträchtliche finanzielle und zeitliche Aufwand vor allem damit gerechtfertigt werden könne, dass nicht nur die beteiligten Experten effektiv für die Bedenken und Meinungen der Bürger sensibilisiert worden seien, sondern auch nichtbeteiligte Entscheidungsträger vor allem innerhalb der Research Councils. Dies belegten Grant et al. (2011, S. 3 ff. u. 41 f.) mit einzelnen Policyentscheidungen, die eine Folge des Dialogs gewesen seien.[65] Im Ergebnis zeigte der »public dialogue«, dass die Beteiligten in der Lage waren, über das komplexe und neue Thema Synbio zu diskutieren und neue Debattenanregungen zu geben (BBSRC et al. 2010, S. 81). Neben Befürchtungen über Risiken konkreter Synbio-Anwendungen ließ sich auch ein allgemeines Unbehagen gegenüber der Veränderung und insbesondere der Neuschaffung von Lebewesen, insbesondere höheren, feststellen. Zu den Forderungen, die aus dem »public dialogue« hervorgingen, gehört die stärkere Berücksichtigung von gesellschaftlichen Perspektiven in der Forschungsförderung, stärkere Reflexion der eigenen Forschung durch Wissenschaftler, die Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung des Regulierungssystems an die Entwicklung der Synbio sowie der Wunsch, dass die Ergebnisse des »public dialogue« im politischen Prozess berücksichtigt werden und auch die Einbindung der Öffentlichkeit in Zukunft noch verstärkt wird (BBSRC et al. 2010, S. 82 ff.).

---

64 Der Dialog »has created a space through which citizens, scientists and stakeholders engaged in an informed debate on the public value, ethics and potential applications of synthetic biology« (BBSRC et al. 2010, S. 15).

65 ebenso die Geschäftsführer des BBSRC und des EPSRC in einem gemeinsamen Brief (www.bbsrc.ac.uk/documents/synthbio-dialogue-response-letter-pdf; 26.11.2015)

**DIE »SYNTHETIC BIOLOGY ROADMAP FOR THE UK« UND DIE ROLLE DES »PUBLIC DIALOGUE« DABEI**

Die Ergebnisse des »public dialogue« zur Synbio werden auch in der Synbio-Roadmap positiv einbezogen. Der Synbio-Dialog habe gezeigt, was beachtet werden müsse, damit eine neue Technologie für die Bürger akzeptierbar sei. So müssten Forscher bereit sein, folgende stilisierte Fragen der Allgemeinheit zu beantworten (BBSRC et al. 2010, S. 19):

> Was ist der Zweck (eurer Forschung)?
> Warum wollt ihr es machen?
> Was wird euer Nutzen sein?
> Was wird es ansonsten noch zur Folge haben?
> Woher wisst ihr, dass ihr richtig liegt?

Bemerkenswert im Vergleich mit anderen öffentlichen Diskursverfahren sind am britischen Synbio-Dialog weniger der Verlauf der Debatte oder die geäußerten Meinungen, sondern vielmehr deren Bedeutung im politischen Entscheidungsprozess. Der Dialog wurde (ganz bewusst) »top down« initiiert, und seine Ergebnisse wurden selbst auf den höchsten Ebenen der beteiligten Research Councils öffentlich gewürdigt. Gleichzeitig betrieben die Councils vielfältige Netzwerkaktivitäten mit dem Zweck, die Verbindungen zwischen Forschung und Industrie zu verbessern.[66] Die Synbio-Roadmap verdeutlicht, dass diese zwei Bestrebungen sich nicht widersprechen sollen, sondern der übergeordneten, langfristigen Absicht dienen, sozial akzeptierbare und gewinnbringende Anwendungen auf den Markt zu bringen. Innerhalb der Logik der Roadmap bildet der frühzeitige Dialog die Bedingung dafür, dass mittelfristig ein »ethical framework« für die Synbio in der britischen Gesellschaft etabliert werden kann. Erst ein solches Framework wiederum stelle sicher, dass langfristig die Bürger Anwendungen der Synbio für wertvoll erachten. »Public engagement« solle als Teil der Bildung einer konstruktiven Geschäftskultur aufgefasst werden, um Großbritannien zum »besten Platz für Synbio« zu machen.[67]

Die »Synthetic Biology Roadmap for the UK« ist Teil der 2011 verkündeten »Strategy for UK life sciences« der britischen Regierung. Sie wurde auf Veranlassung des Technology Strategy Board (TSynbio) unter Einbeziehung verschiedener Stakeholder entwickelt und im Sommer 2012 veröffentlicht (UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group 2012). Ein Fortschrittsbericht wurde im Dezember 2012 veröffentlicht.[68] Folgerichtig bezogen die britischen Minister für Forschung und für Finanzen bereits positiv Stellung zur Roadmap. So zählte der Finanzminister Georg Osborne die Synbio in einer Rede vor der Royal Society am 09.11.2012 zu jenen »eight great technologies«,[69] in deren Erforschung und Vermarktung Großbritannien eine internationale Führungsrolle einnehmen solle. Zu diesem Zweck werde die öffentliche Förderung für Synbio selbst in Zeiten

66 Noch nicht genannt wurden die Synthetic Biology Special Interest Group, die Teil des Biosciences Knowledge Transfer Network ist (https://connect.innovateuk.org/web/synthetic-biology-special-interest-group/overview; 26.11.2015), sowie die Joint Synthetic Biology Initiative, welche rüstungsrelevante Forschungsprojekte mit 1,7 Mio. britischen Pfund fördert (www.bbsrc.ac.uk/jointsyntheticbiology; 26.11.2015).

67 www.rcuk.ac.uk/RCUK-prod/assets/documents/publications/SynthethicBiologyRoad mapLandscape.pdf (26.11.2015)

68 www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/36684/12-1346-strategy-for-uk-life-sciences-one-year-on.pdf (26.11.2015)

69 Diese sind: »The Big Data Revolution«, speziell energieeffiziente Computer, die Synthetische Biologie, die regenerative Medizin, »Agri-Science«, Energiespeicherung, fortschrittliche Materialien, Robotik und autonome Systeme, Satelliten und die kommerzielle Nutzung des Weltraums.

knapper Staatskassen ausgebaut.[70] Die »eight great technologies« werden auch vom damaligen britischen Wissenschaftsminister David Willetts beworben,[71] der im November 2012 in einem offenen Brief die Synbio-Roadmap lobte und die baldige Umsetzung der in ihr gefassten Empfehlungen versprach.[72] Bereits im Januar 2013 wurde entsprechend der Empfehlungen ein »leadership council« für die Synbio eingerichtet.[73] Ferner bekamen im März 2013 15 ausgewählte industriegeleitete Synbio-Projekte Direktförderungen in einer Gesamthöhe von 5,3 Mio. britischen Pfund,[74] weitere 60 Mio. britische Pfund für Research Centres der Synbio, Nachwuchsförderung und Forschungsprojekte wurden im Juli 2013 bewilligt.[75] Im Oktober 2014 veröffentlichte das Centre for Defence Enterprise (CDE) einen Aufruf für Forschungsprojekte zu innovativen Anwendungen der Synbio in den Bereichen Verteidigung und Sicherheit, der mit 4 Mio. britischen Pfund ausgestattet ist.[76] Zuletzt kündigten BBSRC, EPSRC und Medical Research Council (MRC) im Januar 2015 die Förderung von drei weiteren Forschungszentren der Synbio in Edinburgh, Manchester und Warwick an, die bis 2019 insgesamt 32 Mio. britische Pfund erhalten sollen.[77]

Der Zweck dieser Investitionen – die Erforschung und auch die Vermarktung der Synbio zu fördern – wird in der Synbio-Roadmap eingehender beschrieben. Um aktuelle Standortvorteile Großbritanniens auszubauen und sie langfristig zu erhalten, sei es notwendig, die bestehenden Forschungsaktivitäten besser als bisher über eine zentrale Stelle zu vernetzen. Ein solches Innovation and Knowledge Centre (IKC) soll es Unternehmern ermöglichen, mit Forschern in Kontakt zu treten und mittelfristig zur Bildung einer britischen »Synbio community« beitragen.[78] Explizit wird an mehreren Stellen der Roadmap hervorgehoben, dass die Synbio großes wirtschaftliches Potenzial habe und es werden Empfehlungen gegeben, wie Unternehmen dazu angeregt werden können, dieses Potenzial zu verwirklichen. Besonders wichtig sei es, die »Übersetzung« von technischem Wissen in marktreife Anwendungen zu beschleunigen, wobei darauf zu achten sei, dass entsprechende ELSI-Studien vor einer Markteinführung durchgeführt und berücksichtigt werden. Ein weiteres Element der britischen Strategie ist die Einbindung von Sozialwissenschaftlern, Philosophen, Juristen und Künstlern in die Arbeit der Synbio-Forschungszentren im Sinne multidisziplinärer Forschung (siehe dazu auch die Aktivitäten auf EU-Ebene; Kap. V.2.4). Eine effektive Regulierung könne laut der Synbio-Roadmap nur auf internationaler Ebene realisiert werden. Es müsse eine »konstruktive Balance« zwischen Open-Source-Regelungen für die Grundlagen und einem Patentschutz für kommerzielle

---

70 www.hm-treasury.gov.uk/speech_chx_091112.htm (26.11.2015)

71 www.gov.uk/government/speeches/eight-great-technologies (26.11.2015), Willetts beziffert darin das Investitionsvolumen für die Synbio auf 88 Mio. britische Pfund.

72 www.gov.uk/government/publications/response-to-a-synthetic-biology-roadmap-for-the-uk-letter-from-david-willetts-mp-to-dr-lionel-clarke (26.11.2015)

73 www.bris.ac.uk/scn/news/2013/53.html (26.11.2015), das »leadership council« soll alle relevanten Stakeholder zusammenbringen und wird von Lionel Clarke geleitet, welcher der Synbio-Roadmap Coordination Group vorstand.

74 www.gov.uk/government/news/government-invests-5-3-million-in-leading-edge-bioscience (26.11.2015)

75 www.gov.uk/government/news/over-60-million-for-synthetic-biology (26.11.2015)

76 www.gov.uk/government/news/4-million-funding-available-for-synthetic-biology-applications-in-defence (26.11.2015)

77 Im gleichen Rahmen wurden zusätzliche 8 Mio. britische Pfund für weitere Forschungsprojekte an unterschiedlichen Standorten bewilligt (www.bbsrc.ac.uk/news/policy/2015/150129-pr-business-secretary-40m-for-synbio.aspx; 26.11.2015).

78 Es gibt bereits etwa ein Dutzend solcher IKC in Großbritannien, z. B. zu den Themen »Alzheimer« oder »Öl- und Gasindustrie offshore«.

Anwendungen gefunden werden. Die britische Regierung solle hierbei eine Führungsrolle übernehmen und sich auf EU-Ebene für eine i.d.S. angemessene Governance der Synbio einsetzen (UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group 2012, S. 4 f. u. 31 ff.).

**DIE ÜBERRASCHEND GERINGE ÖFFENTLICHE WAHRNEHMUNG DES »PUBLIC DIALOGUE«**

Angesichts des beträchtlichen konzeptionellen und organisatorischen Aufwands zur Förderung des öffentlichen Diskurses über Synbio könnte eine entsprechend große Medienresonanz erwartet werden. Dies scheint überraschenderweise nicht der Fall gewesen zu sein, wie eine Recherche im Rahmen des TAB-Projekts ergab. Wie in Kapitel V.1.1 beschrieben, war die Presseberichterstattung zur Synbio allgemein in Deutschland sowohl gegenüber den USA als auch im europäischen Vergleich in den zurückliegenden Jahren (2008–2011) quantitativ besonders ausgeprägt (DE: 261 Artikel; UK: 125; US: 233; Pauwels et al. 2012, S. 20). Dies mag zum Teil an der Ausdifferenzierung und dem hohen Qualitätsniveau des deutschen Printjournalismus liegen, in dem Wissenschaftsthemen eine vergleichsweise große Rolle spielen.

Unabhängig von der Gesamtzahl läge aber eine Berichterstattung über den »public dialogue« in den britischen Zeitungen, in denen der Großteil der Artikel zur Synbio erschienen ist, nahe (»The Observer«, »The Guardian«, »The Times Higher Education«, »The Scotsman«, »The Daily Telegraph«, »The Herald«, »The Independent«). Die Recherche über die Onlinesuchfunktion dieser Zeitungen sowie der Website der »BBC News« ergab jedoch gerade einmal vier Artikel, in denen der Dialog genannt und diskutiert wurde. Die Beschreibungen des Verfahrensablaufs und der Ergebnisse des Dialogs waren i. d. R. knapp, wobei jeweils unterschiedliche Aspekte des Themas diskutiert werden (Kasten V.2).

**KASTEN V.2: DIE BRITISCHE PRESSE ZUM »PUBLIC DIALOGUE«**

Hintergrund eines Artikels von Connor (2010) im »The Independent« war die Veröffentlichung von Forschungsergebnissen des Craig Venter Instituts im Mai 2010. In der dazugehörigen Pressemitteilung wurde behauptet »künstliches Leben« erschaffen zu haben. Connor (2010) sah dies jedoch relativ gelassen. Der »public dialogue« habe gezeigt, dass die britische Öffentlichkeit mehrheitlich wohl keine Probleme mit »künstlichem Leben« hat, vorausgesetzt es gäbe eine »angemessene« Regulierung der Synbio. So zumindest wurde Brian Johnson zitiert, der den offiziellen Bericht über den »public dialogue« mit anfertigte.

Dieser Bericht wurde auch in einem Artikel von Ghosh (2010) für die »BBC News« dargestellt. Anschließend wurde Paul Freemont vom National UK Innovation and Knowledge Centre for Synthetic Biology (SynbiCITE) at Imperial College London zitiert, der die Öffentlichkeit gezielt dazu aufrief, sich in die Debatte um die Synbio einzumischen. Ferner wurde Brian Johnson mit der Aussage zitiert, dass die Synbio eine bahnbrechende Technologie sei und sogar eine »zweite industrielle Revolution« auslösen könne. Ghosh (2010) verwies allerdings auf skeptische Wissenschaftler und fragte sich, ob man diesem Hype um die Synbio glauben sollte. Paul Freemont sorge sich darum, dass dieser Begriff negative Assoziationen hervorrufen könne und habe deswegen vorgeschlagen, den Namen »Synthetische Biologie« zu ändern. Roland Jackson, damaliger Vorsitzender der British Science Association, hielte hingegen nichts von einer Umbenennung, da dies einer bewussten Täuschung der Öffentlichkeit gleichkäme. Besser sei es laut Jackson, den Bürgern »offen und ehrlich« zu begegnen.

Anlass für einen Artikel von Sample (2011) im »Guardian« war ein von der Royal Society organisiertes Symposium zum Thema Synbio, durch das Vertreter der Wissenschaftsakademien von Großbritannien, den USA und China zusammengebracht wurden. In seiner Eröffnungsrede habe der damalige Wissenschaftsminister David Willetts daran erinnert, dass es für die Entwicklung der Synbio essentiell sei, dass die Öffentlichkeit diese Forschungen weiterhin unterstütze, wobei Willetts positiv auf den »public dialogue« verwiesen habe. Die Synbio dürfe nicht das gleiche Schicksal wie die Grüne Gentechnik erleiden, was aber bisher erfolgreich vermieden werden konnte, so Willetts. Sample (2011) interviewte den chinesischen Biowissenschaftler Zhao Guoping, der es ebenfalls für essenziell halte, dass die Risiken der Synbio verantwortungsvoll kontrolliert würden. Zwar seien einige der in den Medien dargestellten Risiken unrealistisch oder zumindest nicht speziell ein neues Problem der Synbio, andererseits bestehe die Gefahr, dass Einzeltäter durch die Synbio in die Lage versetzt würden, ein tödliches Virus zu synthetisieren, so Zhao. Sample (2011) schloss seinen Artikel mit dem Aufruf, die Kooperation zwischen Großbritannien und China in der Erforschung sowie der Regulierung der Synbio zu fördern.

Turney/Attwood (2011) befassten sich in einem Artikel für »The Times Higher Education« mit einem gänzlich anderen Aspekt des Themas. Sie fragten sich, inwiefern die jüngeren »demokratischen Experimente« (u. a. der Synbio-Dialog), welche zum Ziel hätten, Laien in die Forschungspolitik einzubeziehen, überhaupt glücken bzw. bis zu welchem Grad diese sinnvoll sein können. Um diese Frage zu klären, wurde das Buch des Philosophen Philip Kitcher, »Science in a Democratic Society« diskutiert. Eher theoretische Darstellungen bildeten den Hauptteil des Artikels. Der Hintergrund des Synbio-Dialogs wurde in einer separaten Infobox relativ ausführlich erläutert.

Auch wenn in diesen vier Artikeln der Synbio-Dialog positiv dargestellt wurde, so ist an der geringen Gesamtzahl der Artikel ersichtlich, dass das mediale Interesse am Synbio-Dialog gering war. Es ist freilich nicht auszuschließen, dass der Dialog in anderen Artikeln zumindest indirekt besprochen wurde, ohne diese Veranstaltung namentlich zu nennen. Dennoch ist es wichtig festzuhalten, dass der Synbio-Dialog hauptsächlich innerhalb der Research Councils und der Forschungspolitik[79] auf Resonanz stieß und weniger in den Medien. Dies gilt hingegen nicht für die aktuelle Förderung der Synbio im Rahmen der »eight great technologies« oder der bereits zuvor erwähnten Direktinvestitionen in einzelne Synbio-Projekte im März 2013. Diese Ereignisse finden durchaus breite Medienresonanz, ohne dass die Synbio dabei speziell hervorgehoben wird. Die geringe Medienresonanz des »public dialogues« bestätigt indessen Kritiker des Projekts, die sich an der geringen Öffentlichkeit der Diskussionsveranstaltungen stören. Der Dialog habe den Stimmen der Laien zu wenig Raum gegeben, auch sei die Diskussion in dem zusammenfassenden Bericht einseitig zu positiv im Hinblick auf die Synbio dargestellt worden. Mit Blick auf vergleichbare Dialoge zur Nanotechnologie fordern sie in diesem Zusammenhang eine stärkere Berücksichtigung zivilgesellschaftlicher Interessen in der Forschungspolitik (Wakeford/Haq 2010).

79 Grant et al. (2011, S. 25 f.) verwiesen auf eine Diskussion des Dialogs im House of Commons Science and Technology Committee im Juli 2010.

**KASTEN V.3: MATERIALIEN ZUR ÖFFENTLICHEN VERMITTLUNG DER SYNBIO (2): DEMOCS-KARTENSPIEL ZUM THEMA SYNBIO**

In »The Scotsman« wird ein Kartenspiel zum Thema Synbio in einer knappen Notiz dargestellt und gelobt. Besonders hervorgehoben wird, dass der von der schottischen Regierung finanzierte Dialog vom ESRC Genomics Forum der Edinburgh University beauftragt wurde.[80] Dieser Artikel bezieht sich auf ein partizipatives Verfahren, welches auf dem Deliberative-Meetings-of-Citizens-Prinzip (Democs-Prinzip) basiert und zwischen November 2009 und März 2010 von Edinethics Ltd. durchgeführt wurde. Ein Bericht über dieses Verfahren (Bruce 2010) sowie eine Zusammenfassung[81] sind online zu finden. Auch die eigentlichen Democs-Karten können heruntergeladen werden.[82]

Das Prinzip des Spieles besteht darin, in kleinen Gruppen von sechs bis acht Personen mithilfe von vorgefertigten Themenkarten verschiedene Aspekte eines Themas zu diskutieren, wodurch auch Laien eine eigenständige Meinungsbildung ermöglicht werden soll. Die Idee des Democs-Spiels ähnelt somit stark den zuvor beschriebenen »SynBio Futures«. Edinethics organisierten im genannten Zeitraum 15 Spielrunden an verschiedenen Orten in England und Schottland mit insgesamt 82 Teilnehmern. Laut dem Bericht bestand die Mehrheit der Teilnehmer nicht aus Laien, sondern aus Studenten der Naturwissenschaften mit Vorkenntnissen in Sachen Synbio. Diese hätten jedoch nicht grundsätzlich andere Meinungen vertreten als jene Teilnehmer ohne Vorkenntnisse. Diskutiert wurde vor allem, auf welche Art und in welchem Ausmaß die Synbio reguliert werden solle sowie welche Anwendungen der Synbio attraktiv und/oder risikoreich erscheinen. Weitere Democs-Kartenspiele waren zuvor in Großbritannien für die Themen Stammzellen und Grüne Gentechnik entwickelt und eingesetzt worden. Im Vergleich mit diesen Themen erschien den Organisatoren des Synbio-Democs-Spiels ihr Thema als schwer vermittelbar und unkonkret. Insofern ist ihr Ergebnis nicht überraschend, dass die Diskussionen in den Democs-Spielen wenig polarisiert verliefen. »upstream engagement« sei zu diesem frühen Zeitpunkt der technischen Entwicklung der Synbio nur sehr begrenzt möglich, so schließt der Bericht (Bruce 2010, S. 5 f. u. 11 ff.).

Neben der umfassenden strategischen Betrachtung der Synbio und dem hohen Stellenwert, der Aktivitäten zur Einbeziehung der Öffentlichkeit im eigenen Land zugemessen wird, ist das aktive Knüpfen internationaler Kontakte und Kooperationen ein weiteres Merkmal des britischen Umgangs mit der Synbio. Ein Beispiel für derartige internationale Kooperationen sind die Symposien der sechs Akademien der Länder USA, Großbritannien und China in den Jahren 2011 und 2012.[83] Von britischer Seite waren dabei die Royal Society sowie die Royal Academy of Engineering involviert. Neben dem Austausch über den Stand der Forschung in den einzelnen Ländern ging es bei den Treffen auch um Fragen der internationalen Zusammenarbeit, die Standardisierung und Regulierung der Synbio sowie die Einbeziehung der Öffentlichkeit. Weitere Beispiele der internationalen Kooperationsanbahnung sind koordinierte Förderungsprogramme mit der US-amerikanischen NSF

80 www.scotsman.com/news/card-game-helps-lay-out-public-views-1-1306910 (26.11.2015)
81 www.genomicsnetwork.ac.uk/media/Democs%20Synthetic%20Biology%20Report%20Summary.pdf (26.11.2015)
82 www.genomicsnetwork.ac.uk/forum/news/22223 (26.11.2015)
83 http://sites.nationalacademies.org/PGA/stl/synthetic_biology/index.htm (26.11.2015)

(Synberc 2014, S. 75) sowie einzelne Veranstaltungen in Ländern wie Kanada,[84] Deutschland[85] sowie Polen,[86] bei denen Vertreter der britischen Regierung (z. B. Mitarbeiter der diplomatischen Vertretungen) und britische Wissenschaftler gemeinsam mit lokalen Vertretern aus Wissenschaft und Politik über die Synthetische Biologie diskutierten, häufig unter Einbeziehung der Öffentlichkeit. Die britische Vertretung trat dabei jeweils als Koorganisatorin auf, in einem Fall (Berlin) auch als Gastgeberin der Diskussion. Auch diese Aktivitäten sind als Umsetzung der Synbio-Roadmap zu sehen, die »internationale Kooperation« als eines der fünf Themen behandelt.

## Deutschland 2.5

Im Gegensatz zur Situation in Großbritannien werden die Forschungsaktivitäten in Deutschland nicht übergreifend koordiniert, sondern von ganz unterschiedlichen Akteuren betrieben. So wurden beispielsweise von staatlicher Seite Innovations- und Technikanalysen sowie ELSI-Studien gefördert, bevor Förderprogramme zur Erforschung der Synbio selbst eingerichtet wurden (Bundesregierung 2011). Auch die Diskursaktivitäten zur Synbio folgen keiner übergreifenden Strategie, sondern verdanken sich eigenständigen Initiativen der jeweiligen Akteure. Weitgehende Einigkeit besteht dabei in der Auffassung, dass eine öffentliche Auseinandersetzung mit der Synbio bereits zu einem frühen Zeitpunkt wichtig sei, um die Entwicklung begleiten zu können (Bundesregierung 2011; Köchy/Hümpel 2012).

Um eine solche Auseinandersetzung zu fördern, wurden bisher vor allem Informationen über die Synbio von den unterschiedlichen Akteuren an die Öffentlichkeit gegeben. So berichtet beispielsweise das im Auftrag des BMBF durch die BIOCOM AG betriebene Onlineportal »biotechnologie.de« seit 2008 immer wieder auch über die Synbio. Von zivilgesellschaftlicher Seite erfolgen seit etwa 2013 regelmäßig Berichte auf dem Onlineportal »keine-gentechnik.de«, u. a. mit einem eigenen Dossier zum Thema Synbio (Kap. V.1.3).

Eine Reihe von Stellungnahmen zur Synbio wurde in Teilen in Zusammenarbeit mit Stakeholdern erarbeitet und veröffentlicht, so diejenigen der DFG mit den Akademien acatech und Leopoldina (2009), der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. (2011), der Arbeitsgruppe »Gentechnologiebericht« der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften (BBAW) (Köchy/Hümpel 2012) sowie der ZKBS (2012). Des Weiteren wurden ethische, rechtliche und soziale Fragen der Synbio vor allem durch Expertengremien und deren Studien behandelt, die veröffentlicht und zum Teil auch öffentlich diskutiert wurden. Zu den bedeutendsten Aktivitäten in dieser Hinsicht zählt die Auseinandersetzung des Deutschen Ethikrates mit dem Thema Synbio. Der Ethikrat hat zwar keine eigene Stellungnahme zur Synbio erarbeitet, er hat aber mit zwei öffentlichen (und gut dokumentierten) Diskussionsveranstaltungen zum gesellschaftlichen Diskurs über Fragen der Synbio beigetragen. Im Februar 2010 war die Synbio Thema eines »Forums Bioethik« in Berlin, bei dem es insbesondere um die ethischen und anthropologischen Aspekte der

---

84 UK-Canada Synthetic Biology Workshop, 27.–28.10.2014, Montréal (http://uk-canadasyntheticbiology.yolasite.com; 26.11.2015)

85 Podiumsdiskussion »Biotechnology and Synthetic Biology: Potential applications and governance of groundbreaking technologies«, 20.10.2014, Berlin (www.bbaw.de/veranstaltungen/2014/oktober/biotechnology; 26.11.2015)

86 Internationaler Workshop »Opportunities and challenges presented by synthetic biology«, 25.11.2014, Warschau (www.nauka.gov.pl/g2/oryginal/2014_11/7719ceee4efd3b6a50b5110e789cade5.pdf; 26.11.2015)

Synbio ging.[87] Neben den Mitgliedern des Ethikrates kamen dabei wissenschaftliche Experten aus der Synbio sowie der Philosophie und Theologie zu Wort, auch das Publikum war zur Diskussion eingeladen. Im November 2011 veranstaltete der Ethikrat eine öffentliche Tagung zur Synbio in Mannheim,[88] um die ethischen Herausforderungen in das Blickfeld der Öffentlichkeit zu rücken. Die Redner waren dementsprechend aus ganz unterschiedlichen Feldern eingeladen, neben Naturwissenschaftlern und Experten für Ethik bzw. Technikfolgenabschätzung kamen auch Vertreter von NRO, eines iGEM-Teams sowie von Unternehmen zu Wort. Nach Angaben der Veranstalter war es die erste Veranstaltung in Deutschland, »die auch ein Stück Stakeholder-Diskussion in [ihre] Strukturen einbaut« (DER 2011, S. 82; siehe aber zu einer ähnlich gestalteten Veranstaltung in Karlsruhe im Juni 2011). Auch in diesem Fall war das Publikum in die Diskussion involviert, wobei auch im Publikum weitere Experten vertreten waren (siehe die dokumentierten Stellungnahmen in DER 2011). In einem Fazit zur Veranstaltung forderten mehrere Mitglieder des Ethikrates u. a. ein »gesellschaftliches Monitoring« der Synbio (Catenhusen et al. 2013, S. 131), in dem Fragen der Begleitforschung, aber auch der Gesellschaft »nach Nutzen und Risiken und damit nach Wegen eines verantwortlichen Umgangs« artikuliert und bearbeitet werden können (ebd., S. 132). Der Ethikrat selbst hat bislang allerdings keine weiteren Schritte zur Umsetzung dieser Forderung unternommen.

Die technikwissenschaftliche Akademie acatech hat zusätzlich zu ihrer Beteiligung an der gemeinsamen Stellungnahme mit der DFG und der Akademie Leopoldina, die auch im Rahmen eines parlamentarischen Abends der drei Forschungsorganisationen diskutiert wurde, weitere Aktivitäten durchgeführt, die sich stärker auf die öffentliche Wahrnehmung der Synbio richten. So kamen im Oktober 2010 Journalisten ins Frankfurter Senckenberg-Museum, um im Rahmen eines Workshops über die Möglichkeiten der Berichterstattung über Synbio zu diskutieren.[89] Bereits 2009 hatte acatech zusammen mit der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) in Basel einen Workshop zur Synbio mit Gästen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik veranstaltet.[90] Außerdem unterstützte acatech gemeinsam mit dem Wissenschafts-Pressekonferenz e. V. (WPK) eine Onlinedebatte zur Synbio auf dem Portal »Für und Wider«.[91] Auf dieser Onlineplattform konnten interessierte Teilnehmer vom Herbst 2010 bis Januar 2011 Informationen und Stellungnahmen zu den Themen Biosafety, Ethik sowie Synthi-Fuels abgegeben und mit den anderen Teilnehmern diskutieren. Eine Besonderheit dabei war, dass die Beiträge in ihrem argumentativen Zusammenhang auf der Onlineplattform in Form von sogenannten »Debattenkarten« visualisiert wurden. Bei diesem redaktionell von Wissenschaftsjournalisten betreuten »neuen Format partizipativer Technikfolgenabschätzung«[92] kamen neben Wissenschaftlern der Synbio und der Begleitforschung auch Mitarbeiter der Europäischen Kommission sowie von NRO zu Wort (vgl. auch Weitze/Ohlendorf 2011, S. 149). In einer weiteren Publikation, die auf die allgemeinverständliche

87 www.ethikrat.org/veranstaltungen/forum-bioethik/synthetische_biologie (26.11.2015)
88 www.ethikrat.org/veranstaltungen/weitere-veranstaltungen/werkstatt-leben (26.11.2015)
89 www.acatech.de/de/aktuelles-presse/sonderseiten/journalistenworkshop-synthetische-biologie.html (26.11.2015)
90 www.acatech.de/de/aktuelles-presse/veranstaltungen/veranstaltung/kalender/event/2009/01/21/synthetische-biologie-satw-und-acatech-bringen-technik-und-biologie-in-basel-zusammen/tx_cal_phpicalendar/view-list|page_id-1730.html (21.01.2015)
91 www.synbio.fuerundwider.org (26.11.2015)
92 Eigendarstellung der Betreiber (www.synbio.fuerundwider.org/themen-vorschlagen; 26.11.2015).

Darstellung der Synbio zielt, hat acatech angekündigt, den gesellschaftlichen Dialog zur Synbio fortführen zu wollen (Pühler et al. 2011, S. 149).

Eine besondere Form des interdisziplinären Dialogs stellt der »Tutzinger Diskurs« zum Thema »Gute Wissenschaft« dar, der vom BMBF gefördert wurde. Bei diesem Projekt der Akademie für Politische Bildung Tutzing wurden Nachwuchswissenschaftler der Lebenswissenschaften mit Bioethikern sowie Wissenschaftsjournalisten in einem Diskurs zusammengebracht. Im Zeitraum von Oktober 2012 bis März 2013 trafen sich die 22 Teilnehmer zu insgesamt drei zweieinhalbtägigen moderierten Diskussionen, in denen u. a. das Thema Synbio mit Blick auf Kriterien guter Wissenschaft diskutiert wurde (als zweiter Schwerpunkt wurde die Hirnforschung gewählt) (Spieker 2013). Das Verfahren ähnelt dabei in methodischer Hinsicht etablierten Verfahren der partizipativen TA wie der Zukunfts- bzw. der Konsensuskonferenz. Wie bei diesen Verfahren wurde eine Gruppen von Teilnehmern mit heterogenen Erfahrungshintergrund (im Tutzinger Fall junge Wissenschaftler aus den Lebenswissenschaften, der Philosophie bzw. Sozialwissenschaft sowie Wissenschaftsjournalisten) in geschlossenen Diskussionsveranstaltungen zusammengebracht, um unter Anleitung von Moderatoren eine gemeinsame Position (das »Memorandum« des Tutzinger Diskurses; Spieker 2013) zu erarbeiten. Experten zu den einzelnen Fachthemen ergänzten die Diskussionen mit Vorträgen. Allerdings erfolgte die Auswahl der Teilnehmer nicht nach dem Zufallsprinzip, sondern gezielt mithilfe eines Bewerbungsverfahrens (die Teilnehmer erhielten ein Stipendium). Auch war der Ablauf weniger strikt vorgegeben, als dies bei den TA-Verfahren mit ihrer zeitlichen (Konsensuskonferenz) bzw. sachlichen (Zukunftskonferenz) Struktur der Fall ist.

Ziel des Diskurses war aber ebenfalls die öffentliche Präsentation einer Stellungnahme, die am 14. März 2013 im Rahmen einer Podiumsdiskussion erfolgte. Darin schlugen die Teilnehmer u. a. Verbesserungen bei der Bewertung wissenschaftlicher Leistungen vor, eine bessere Heranführung an gute Wissenschaft in Schule und Hochschule, die frühzeitige Reflexion wissenschaftlicher und technischer Entwicklungen sowie eine transparente und realistische Kommunikation von Wissenschaft gegenüber der Öffentlichkeit (Spieker 2013). Auch wenn hochrangige Vertreter der Wissenschaftsorganisationen und des Journalismus an der Abschlusspräsentation teilnahmen und die Ergebnisse auch beim BMBF präsentiert werden sollten, ist nicht nachvollziehbar, inwieweit die Ergebnisse des Diskurses in den (wissenschafts)politischen Diskurs tatsächlich eingegangen sind. Zwar berichteten einige Onlinebeiträge über den Diskurs und seine Ergebnisse (u. a. beim wissenschaftlichen Blogportal »SciLogs«[93]), und die Teilnehmer betreiben eine eigene, interaktive Onlinepräsenz zur Weiterführung der Debatte,[94] doch bislang wurden im dortigen Diskussionsforum keine Beiträge veröffentlicht.

Die EA European Academy führte von 2011 bis 2014 ein TA-Projekt durch, gefördert durch die Klaus Tschira Stiftung gemeinnützige GmbH. Im Rahmen einer internationalen Summerschool zum Thema »Analyzing the Societal Dimensions of Synbio« in Berlin (15.–19.9.2014) organisierte sie auch eine öffentliche Podiumsdiskussion.[95] Ähnliche öffentliche Diskussionsveranstaltungen wur-

93 www.scilogs.de/gute-stube/tutzinger-memorandum/ (26.11.2015)
94 http://gute-wissenschaft.de (26.11.2015)
95 dokumentiert unter www.ici-berlin.org/event/614/ (26.11.2015)

den auch verschiedentlich von beispielsweise den evangelischen Akademien sowie von Wissenschaftsinstitutionen durchgeführt.[96] Auch im Rahmen der Helmholtz-Initiative Synthetische Biologie (2012–2014) fand im Dezember 2013 eine öffentliche Diskussionsveranstaltung zu ethischen Fragen der Synbio in Verbindung mit einer Fachtagung in Heidelberg statt.[97] Bei dieser Veranstaltung wurde zugleich auch die Ausstellung einer internationalen Künstlergruppe eröffnet, die sich als Teil der Initiative aus künstlerischer Perspektive mit den Fragen der Synbio beschäftigen und dabei eng mit den beteiligten Naturwissenschaftlern zusammenarbeiten.[98] Das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) diskutierte die Synbio im November 2014 im Rahmen eines Symposiums zu »Neuen Entwicklungen in der Gentechnik«, bei dem Experten des gesundheitlichen Verbraucherschutzes die Zielgruppe waren.[99]

Weitere Forschungsprojekte, die sich unmittelbar mit ethischen, rechtlichen und gesellschaftlichen Fragen der Synthetischen Biologie befassen, sind die vom BMBF geförderten Projekte »Engineering Life« (2010–2013; Koordination: Universität Freiburg) sowie »SynbioTA« (2010–2013; Koordination: Universität Bremen). Während bei den wissenschaftlichen Workshops des letzteren Projekts auch Vertreter von Unternehmen der Synbio sowie von NRO (BUND, ETC Group) beteiligt waren,[100] veranstalteten die Organisatoren des Projekts »Engineering Life« mehrere öffentliche Tagungen mit Podiumsdiskussionen, bei denen unterschiedliche Stakeholder aus Politik, DIY-Biologie, Zivilgesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft miteinander ins Gespräch kamen.[101] Ein weiteres Ergebnis dieses Projekts waren mehrere »Evidence Maps« zum Stand der Forschung im Bereich der Synbio sowie zu Risikoaspekten. Dabei handelt es sich um Visualisierungen von Forschungsergebnissen und deren argumentativen Zusammenhängen, die zur Unterstützung der Diskussion bei Expertenworkshops und – über die Website des Projekts – mit der Öffentlichkeit genutzt wurden.[102] Deutsche Wissenschaftsinstitutionen sind außerdem in EU-Programmen wie »Horizont 2020« und »ERASynBio « in Forschungsprojekte zur Synbio und zur Begleitforschung zu den ethischen, rechtlichen und gesellschaftlichen Fragen der Synbio involviert. Bereits im Juni 2011 veranstaltete beispielsweise das ITAS in Kooperation mit dem Zentrum für Kunst und Medientechnologie Karlsruhe (ZKM) eine öffentliche Podiumsdiskussion in Karlsruhe im Rahmen des EU-geförderten Projekts »Synth-Ethics«.[103] Dabei stellten neben Synbio-Forschern auch je zwei Vertreter von Syn-

---

96 Zum Beispiel: Institut für Kirche und Gesellschaft der Evangelischen Kirche von Westfalen: Tagung »Projekt Genesis – Wie Naturwissenschaften und Medizin neues Leben konstruieren«, 12.–14.12.2008, Schwerte; Evangelische Akademie Meißen: Tagung »Synthetische Biologie:synthetisches Leben?«; 8.–10.4.2011, Meißen; Evangelische Akademie Baden: Tagung »Vom Homo faber zum Homo creator«, 31.1.–2.2.2014, Bad Herrenalb; Institut für Wissenschaft und Ethik (IWE): Ethikforum »Synthetische Biologie: Auf dem Weg zum künstlichen Leben?«, 4.7.2011, Bonn (http://ethik-forum.net/archiv/2011; 26.11.2015); Petra Schwille: Vortrag »Ist Leben konstruierbar?« in der Reihe »Wissenschaft im Theater«, 2.12.2013, Dresden (http://tu-dresden.de/aktuelles/
newsarchiv/2013/11/wit_schwille/newsarticle_view; 26.11.2015)

97 http://ibios.dkfz.de/tbi/images/News/Flyer_SynBio_Podiumsdiskussion_Vernissage_A6.pdf (26.11.2015)

98 www.dkfz.de/de/presse/pressemitteilungen/2013/dkfz-pm-13-47c-Internationale-Kuenst
lergruppe-thematisiert-die-Synthetische-Biologie-in-vier-Kunstprojekten.php (26.11.2015)

99 www.bvl.bund.de/symposium2014 (26.11.2015)

100 www.tecdesign.uni-bremen.de/typo3/index.php?id=679 (26.11.2015)

101 https://egmengineeringlife.wordpress.com (26.11.2015)

102 https://egmengineeringlife.wordpress.com/2011/07/07/veroffentlichung-der-evidenzkartierungen-tp-3/ (26.11.2015); die »Evidence Maps« selbst finden sich unter www.itas.kit.edu/pub/v/2011/koua11a.pdf (26.11.2015).

103 http://on1.zkm.de/zkm/stories/storyReader$7553 (26.11.2015)

bio-Unternehmen und NRO ihre Sichtweise auf Synbio vor und diskutierten diese mit dem Publikum. Zur Einführung wurden neben Vorträgen von Ethikern der Synbio auch Kurzfilme des BIO·FICTION Science Art Film Festivals gezeigt (Informationen zu weiteren Diskursaktivitäten im Rahmen von EU-geförderten Projekten in Kap. V.2.6).

**STRATEGIEPROZESS BIOTECHNOLOGIE 2020+**

Die Synbio ist auch Teil des nationalen Strategieprozesses »Biotechnologie 2020+«, den das BMBF zusammen mit der MPG, der Helmholtz-Gemeinschaft, der Leibniz-Gemeinschaft sowie der Fraunhofer-Gesellschaft im Jahr 2010 angestoßen hat und selbst mit bis zu 200 Mio. Euro (über einen Zeitraum von 10 bis 15 Jahren) unterstützt. Bis 2014 wurden dabei 35 Projekte mit insgesamt 42 Mio. Euro gefördert. Beispiele für Synbio-bezogene Forschung in diesem Rahmen sind die Aktivitäten der MPG, die 2014 das Forschungsnetzwerk »MaxSynBio« eingerichtet hat.[104] Daran wirken neun Institute mit, die gemeinsame Forschungen zur Konstruktion synthetischer Zellen durchführen. Außerdem ist zur Untersuchung von Fragen zu künstlichen Lebensformen und deren Verwendung in technologischen Prozessen der Lehrstuhl für Systematische Theologie II (Ethik) der Universität Erlangen-Nürnberg beteiligt. Die Helmholtz-Gesellschaft fördert seit 2012 im Rahmen ihrer »Helmholtz-Initiative Synthetische Biologie« die Vernetzung der Synbio-Forschung an mehreren Helmholtz-Instituten und Universitäten mithilfe des Impuls- und Vernetzungsfonds (zunächst befristet bis 2014 mit anschließendem Übergang in die grundfinanzierte programmorientierte Förderung).[105] Dabei geht es um die Entwicklung von Technologieplattformen und um Anwendungsprojekte in den Forschungsbereichen Gesundheit und Schlüsseltechnologien. Auch bei diesem Netzwerk befasst sich ein Begleitforschungsprojekt mit ethischen und sozialen Aspekten sowie mit der verantwortungsvollen Entwicklung und Governance von Synbio. Außerdem wurde eine Datenbank für die Aufbewahrung und den Austausch von Plasmiden eingerichtet, das »Helmholtz-Repository of BioParts«.[106]

Weitere Forschungsförderung erfolgt durch die DFG, die seit 2007 das BIOSS Centre for Biological Signalling Studies der Universität Freiburg fördert, das bei der Untersuchung biologischer Signalprozesse u. a. mit Ansätzen der Synbio arbeitet.[107] Die Philipps-Universität Marburg und das Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie richteten mit Unterstützung des Landes Hessen 2010 das LOEWE-Zentrum für Synthetische Mikrobiologie (SYNMIKRO) ein.[108] Das Zentrum untersucht mit synthetischen und analytischen Forschungsansätzen grundlegende Eigenschaften zellulärer Prozesse und entwickelt Verfahren, um Zellen und Zellbestandteile mit neuartigen Funktionen zu versehen. Es richtet regelmäßig Veranstaltungen zur Synbio-Forschung aus und fördert die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses, u. a. durch Unterstützung des Marburger iGEM-Teams.

Der Strategieprozess »Biotechnologie 2020+«, der neben Forschungsprojekten und Aktivitäten der Begleitforschung und Öffentlichkeitsarbeit auch die Erarbeitung einer Roadmap umfasst, richtet sich allerdings nicht allein auf die Synbio, sondern allgemein auf zukünftige biotechnologische Verfahren. Neben der Synbio spielen dabei insbesondere die Mikrosystemtechnik, die Bioinformatik und die Systembiologie eine Rolle. Eine Besonderheit dabei ist, dass forschungspolitische Akteure

---

104 www.mpg.de/7424658/MaxSynBio (26.11.2015)
105 www.helmholtz.de/index.php?id=3759 (26.11.2015)
106 www.herbi.kit.edu/ (26.11.2015)
107 www.bioss.uni-freiburg.de (26.11.2015)
108 http://synmikro.com (26.11.2015)

eng mit etablierten wie auch Nachwuchswissenschaftlern (z. B. den deutschen iGEM-Teams) zusammenarbeiten, um die Förderpolitik strategisch auszurichten. Der Strategieprozess richtet sich mit seinen Veranstaltungen zwar an »Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik ..., die an der Entwicklung der nächsten Generation biotechnologischer Verfahren mitwirken wollen«,[109] allerdings sind – abgesehen von den beschriebenen geförderten Einzelmaßnahmen – keine unmittelbar partizipativen Elemente enthalten.

Zivilgesellschaftliche Organisationen weisen darauf hin, dass sie als »Advokaten für Umwelt, Naturschutz und Menschenrechte« bei dieser Strategieentwicklung nicht ausreichend beteiligt und berücksichtigt sind (Ober 2014, S. 4). Unter dem Namen »Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende« haben sich einige NRO zusammengeschlossen, um zivilgesellschaftliche Sichtweisen stärker in die Forschungspolitik, u. a. zur Bioökonomie, einzubringen (zur Kritik daran von Seiten der institutionalisierten Wissenschaft Kap. V.2.7). In der Tat sind in Deutschland NRO bislang kaum als Akteure im Diskurs über die Synbio in Erscheinung getreten (Kap. V.1.3). Zwar sind Repräsentanten von BUND, ETC Group und Testbiotech bei verschiedenen Veranstaltungen und Stellungnahmen aufgetreten, waren deutsche NRO bereits 2006 an dem offenen Brief zivilgesellschaftlicher Organisationen zur Neuausrichtung der Forschung zur Synbio beteiligt (Stemerding et al. 2009, S. 172 ff.) und organisierten bereits 2008 einen Workshop zu Umwelt- und sozioökonomischen Risiken der Nanotechnologie und Synbio im Rahmen des Kongresses »Planet Diversity«.[110] Abgesehen davon bleiben die NRO allerdings beim Stadium der Beobachtung und internen Meinungsbildung und haben selbst noch nicht dazu angesetzt, den gesellschaftlichen Diskurs zur Synbio zu organisieren.

## EU: Forschungsförderungspolitik zur Synbio 2.6

Ähnlich wie in Großbritannien wurde die Synbio auch auf europäischer Ebene bereits früh strategisch betrachtet und durch Forschungsprojekte gefördert und begleitet. Die Rolle der Europäischen Kommission liegt dabei allerdings stärker auf der Stimulation und Moderation von Aktivitäten europäischer Akteure denn auf einer direkten Einflussnahme. Entsprechend geht es bei den Aktivitäten vor allem darum, die Rahmenbedingungen für Forschung und Innovation in der Synbio zu gestalten. Der Diskurs bleibt auf Experten begrenzt und wird von einer Vielzahl von meist national organisierten Akteuren der Forschungsförderung, der wissenschaftlichen Forschung, der Wirtschaft sowie der Begleitforschung getragen (Stemerding/Rerimassie 2013, S. 8).

Im Rahmen der europäischen Forschungsförderung wurde die Synbio bereits im Jahr 2003 als Förderschwerpunkt der »NEST Pathfinder initiative« des 6. Forschungsrahmenprogramms bestimmt. Zwischen 2005 und 2011 wurden zunächst 18 transnationale Forschungsprojekte mit insgesamt knapp 25 Mio. Euro unterstützt.[111] Die Initiative richtete sich gezielt auf neue, interdisziplinäre Forschungsfelder, deren längerfristiges Potenzial zum damaligen Zeitpunkt noch nicht absehbar war. Neben den eigentlichen Forschungsprojekten umfasste das Programm auch zwei strategisch

109 www.biotechnologie2020plus.de (26.11.2015)

110 www.planet-diversity.org/de/workshops/workshop2/nanotechnologie-und-synthetische-biologie.html (26.11.2015)

111 http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/140794581EN8.zip (26.11.2015); unter den Partnern waren z. T. auch Forschungseinrichtungen außerhalb der EU, sodass eines der EU-Projekte das erste chinesische Forschungsprojekt zur Synbio darstellt (Zhang et al. 2011, S. 13).

ausgerichtete Projekte (u. a. »Toward a European Strategy for Synthetic Biology« [TESSY], in dem unter Einbeziehung der europäischen »Scientific Community« sowie von Förderorganisationen eine europäische Roadmap entwickelt wurde; Gaisser et al. 2009), zwei Projekte zum Aufbau einer europäischen Forschungscommunity sowie ein Begleitforschungsprojekt (»SYNBIOSAFE«, 2007–2008), mit dem erstmals in Europa Fragen der Risiken und der Ethik der Synbio bearbeitet wurden (OECD 2014, S. 151). Der Anteil dieser fünf Begleitforschungsprojekte am gesamten Förderbudget der Synbio lag bei 10 %, der Anteil des ELSI-Forschungsprojekts »SYNBIOSAFE« allein bei 1 %. Ergänzend zu den Forschungsaktivitäten wurde 2005 eine NEST High-Level Expert Group einberufen, die international mit Forschern sowie Unternehmensvertretern besetzt war. Diese stellte insbesondere den Bedarf einer Koordination der Forschung und der Bildung einer wissenschaftlichen Gemeinschaft fest, ebenso wie die Notwendigkeit der Vereinbarung von Zielen und Standards und der Auseinandersetzung mit ethischen Fragen und Risiken (NEST 2005). Sie empfahl die Fortsetzung und Ausweitung der Förderung im Rahmen einer europäischen Strategie.

Die Förderung der Synbio-Forschung wurde im 7. Forschungsrahmenprogramm fortgeführt, nun vor allem durch das Programm zur Förderung einer europäischen wissensbasierten Bioökonomie (»knowledge-based bio-economy« [KBBE]; Projekte: »TARPOL«, »BASYNTHEC«, »ST-FLOW«, »PROMYSE«, »METACODE« mit insgesamt ca. 16 Mio. Euro Fördervolumen). Darüber hinaus wurden einzelne Synbio-Projekte in anderen Programmen gefördert bzw. Projekte, die u. a. Synbio-bezogene Forschung umfassten. Die Gesamtsumme der Förderung für Synbio im 7. Forschungsrahmenprogramm belief sich auf 86 Mio. Euro (ERASynBio 2014, S. 9). Zur Begleitung des KBBE-Programms wurde eine Steuerungsgruppe mit hochrangigen Vertretern der im Forschungsrahmenprogramm involvierten Staaten eingerichtet (KBBE-NET), der eine Working Group on Synthetic Biology zugeordnet wurde (Gaisser/Reiß 2009). Ethische Fragestellungen der Synbio wurden durch zwei Projekte des Science-in-Society-Programms bearbeitet (»SYBHEL« 2009–2012; »Synth-Ethics« 2009–2011), die durch das Mobilisierungsprojekt »SYNENERGENE« (2013–2017) ergänzt wurden, das ebenfalls einen Fokus auf ELSI-Aspekte legt (Kap. V.2.7).[112] Außerdem wird mit dem »European Research Area Network for the development and coordination of synthetic biology in Europe« (ERASynBio) die Vernetzung und Abstimmung der europäischen Forschungsförderungseinrichtungen im Bereich Synbio gefördert, von denen 15 im Netzwerk involviert sind.[113] Diese finanzierten auch gemeinsam Synbio-Forschungsprojekte im Rahmen von zwei Ausschreibungen, für die 13 Mio. Euro für acht Forschungsprojekte[114] respektive 10 Mio. Euro für sieben Forschungsprojekte[115] bereitgestellt wurden. Im Rahmen von ERASynBio wurde auch die Kooperation mit US-amerikanischen Förder- sowie Forschungsinstitutionen erweitert, außerdem erarbeiteten die Partner eine »strategic vision« für die Forschung zur Synbio in Europa (ERASynBio 2014). Die Arbeit des Netzwerks wird seit Anfang 2015 auch ohne Förderung durch die EU fortgesetzt.[116]

Das Strategiepapier ähnelt in seinem Aufbau und in seiner intendierten Bedeutung der britischen Roadmap (Kap. V.2.4) – ob es auf europäischer Ebene einen vergleichbaren Stellenwert erlangt, muss sich erst noch zeigen (ERASynBio 2014). Die Autoren schreiben der Synbio eine zentrale

112 Das Fördervolumen dieser drei ELSI-bezogenen Projekte liegt bei ca. 5,3 Mio. Euro. Für das ERASynBio wurden weitere knapp 2 Mio. Euro bereitgestellt.
113 www.erasynbio.eu/index.php?index=8 (26.11.2015)
114 www.erasynbio.eu/joint-calls/1st-call (26.11.2015)
115 www.erasynbio.eu/joint-calls/2nd-call (26.11.2015)
116 www.erasynbio.eu/lw_resource/datapool/_items/item_81/erasynbio_nl6_december 2014.pdf (26.11.2015)

Rolle in der europäischen Bioökonomie und bei der Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen zu. Damit die Synbio dieser Rolle gerecht werden kann, fordern sie eine Verstärkung der Förderung der Grundlagenforschung, aber auch der koordinierten Forschung und eine Ausrichtung derselben am gesellschaftlichen Bedarf. Die Rolle der Förderorganisationen sehen sie vor allem in der Überbrückung von disziplinären und regionalen Trennungen sowie in der Nachwuchsförderung. Außerdem betonen sie die Bedeutung offener Daten und Infrastrukturen für die Weiterentwicklung der Synbio (ERASynBio 2014). Das Strategiepapier wurde von den ERASynBio-Partnern gemeinsam mit Stakeholdern aus Wissenschaft, Politik bzw. Verwaltung und der Forschungsförderung entwickelt und auf zwei Strategiekonferenzen diskutiert.

Die ebenfalls von den Forschungsförderungseinrichtungen der Mitgliedstaaten getragene European Science Foundation (ESF) finanzierte zwischen 2010 und 2013 insgesamt fünf Projekte in einem der Synbio gewidmeten EUROpean COllaborative RESearch Scheme (EUROCORE Scheme) unter dem Namen »Synthetic Biology: Engineering Complex Biological System« (EuroSYNBIO), darunter mit »Synthetic biology to obtain novel antibiotics and optimized production systems« (SYNMOD)[117] eines, das sich neben der Synbio-Forschung explizit auch den sozialen und ethischen Fragen der Synbio widmete, was in der Evaluation des Programms als besonders wertvoll für die Synbio insgesamt bewertet wurde (ESF-Evaluation EUROCORES).[118] Im Rahmen von »EuroSYNBIO« wurde auch der Dokumentarfilm »Synthetic Biology in Europe« produziert, der das Forschungsfeld am Beispiel der fünf ESF-geförderten Projekte vorstellt.[119]

**KASTEN V.4: MATERIALIEN ZUR ÖFFENTLICHEN VERMITTLUNG DER SYNBIO (3): COMPUTERSPIEL DES SYNMOD-PROJEKTS**

»SYNMOD« war ein ESF-gefördertes Projekt unter Leitung der Universität Groningen, das mithilfe der Synbio neue Moleküle zum Einsatz als Antibiotika entdecken möchte. Dazu werden Peptidmodule der Gruppe der Lantibiotika neu kombiniert und auf ihre Wirkung als Antibiotika getestet. Das Projekt dient auch dazu, die ingenieurmäßige Entwicklung nach den Prinzipien der Synbio im Feld der Antibiotika-Entwicklung zu erproben.

Im Rahmen des Projekts wurde durch die sozialwissenschaftlichen Partner der österreichischen Biofaction KG neben der Bearbeitung ethischer Fragestellungen u. a. ein Computerspiel in Form einer Smartphone-App entwickelt, mit dem sich spielerisch die Zielstellung des Projekts und einige der Schwierigkeiten bei seiner Umsetzung erfahren lassen. Das Spiel gibt zunächst eine kurze Einführung in die Entwicklung von Antibiotika und die Rolle der Synbio dabei. Dann stellt es jeweils ein Bakterium vor, für das durch Kombination von Aminosäuren ein Protein als Gegenmittel gefunden werden soll. Sowohl die Erreger als auch die 20 Aminosäuren sind als animierte Zeichentrickfiguren gestaltet. Die Kombination der Aminosäuren und die Zusammensetzung der entsprechenden Peptidmodule ist im Spiel als Spielautomat gestaltet (»slot machine«) – werden die Module in der richtigen Reihenfolge angeordnet, lässt sich der Effekt auf

117 www.esf.org/coordinating-research/eurocores/completed-programmes/eurosynbio/pro jects-crps/synmod.html (26.11.2015)
118 www.esf.org/coordinating-research/eurocores/reporting/final-reports-of-completed-euro cores-programmes.html (26.11.2015)
119 www.esf.org/media-centre/ext-single-news/article/the-eurocores-programme-eurosynbio-releases-new-video-1024.html (26.11.2015)

die Erreger nach dem (virtuellen) Ziehen des Hebels der Maschine in einer Animation nachvollziehen: Im Erfolgsfall wird als »Gewinn« das Bakterium vernichtet.

Das Spiel führt auf diese Weise spielerisch in die Herausforderungen und die prinzipielle Vorgehensweise der Synbio ein (»gamification«). Es zielt außerdem darauf, die Nutzer (das Spiel richtet sich in erster Linie an Jugendliche) mit den Aminosäuren bekannt zu machen, deren Namen immer wieder erwähnt werden und deren molekulares Reaktionsverhalten entsprechend der realen Verhältnisse abgebildet wurde (Schmidt et al. 2014).

Im aktuellen Horizont-2020-Forschungsrahmenprogramm wird die Förderung der Synbio weitergeführt, insbesondere durch ein explizit der Synbio gewidmetes Programm im Bereich »Biotechnology« (H2020-LEIT-BIO-2014-1, Topic 1) mit 18 Mio. Euro Fördermitteln. Neu gegenüber den vorausgegangenen Initiativen ist, dass die Berücksichtigung der Prinzipien verantwortungsvoller Forschung und Entwicklung (RRI) integraler Bestandteil der Projekte sein soll (Kap. V.2.7). Eine Förderung der Synbio erfolgt auch im Rahmen weiterer, nicht unmittelbar auf Synbio bezogener Programme sowie durch den ERC, der individuelle Projekte herausragender Forscher fördert (Synberc 2014, S. 72).

Die Europäische Kommission stimmt sich außerdem transnational insbesondere mit der US-Regierung ab. Nach einem gemeinsamen Workshop 2006 in den USA war Synbio im Juni 2010 auch Thema der EU-US Task Force on Biotechnology Research, einem transatlantischen Forum zur Koordination der Forschung zur Biotechnologie der Europäischen Kommission und der US-Regierung (White House Office of Science and Technology Policy). Bei dem Workshop ging es speziell um Fragen der Standardisierung. Die Task Force richtete auch eine eigene Arbeitsgruppe zur Synbio ein, um diese Fragen weiter zu behandeln.[120] Die NSF fungiert außerdem als Beobachter im ERASynBio-Netzwerk der Förderorganisationen.[121]

**BEGLEITFORSCHUNG ZU DEN ETHISCHEN, RECHTLICHEN UND SOZIALEN AUSWIRKUNGEN**

Aktivitäten der ELSI-Begleitforschung haben seit Längerem einen beachtlichen Stellenwert in der EU-Förderung der Synbio. Bis zum Horizont-2020-Programm wurde sie zumeist in gesonderten Projekten bearbeitet (das ESF-Projekt »SYNMOD« stellte eine Ausnahme dar). Außer der Europäischen Kommission (über die Forschungsrahmenprogramme) und den nationalen Förderorganisationen (über ERASynBio bzw. die ESF) wurden dabei auch die TA-Einrichtung Science and Technology Option Assessment (STOA) des Europäischen Parlaments, die EGE sowie die wissenschaftlichen Kommissionen (federführend das Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks [SCENIHR]) aktiv. Die wesentlichen Projekte werden im Folgenden überblicksartig dargestellt:

*SYNBIOSAFE (2007–2008)*

Das EU-Projekt »SYNBIOSAFE«[122] (koordiniert vom österreichischen International Dialogue and Conflict Management [IDC]) zielte auf die Untersuchung möglicher Risiken der Synbio und auf

120 http://ec.europa.eu/research/biotechnology/eu-us-task-force/index_en.cfm?pg=working group (26.11.2015)
121 www.erasynbio.eu/index.php?index=8 (26.11.2015)
122 http://synbiosafe.eu (26.11.2015)

deren Reflexion in Hinblick auf ethische Fragen. Außer engen Kontakten zur wissenschaftlichen Community der Synbio-Forscher wurden durch das Projekt auch Kontakte zur breiteren Öffentlichkeit initiiert, insbesondere durch die Produktion eines Dokumentarfilms zu Sicherheits- und ethischen Fragen der Synbio[123] sowie durch ein Onlinediskussionsforum. An diesem nahmen insgesamt 124 Personen aus Europa teil, zum größten Teil Wissenschaftler, aber auch Vertreter der Industrie, zivilgesellschaftlicher Organisationen sowie der Kunst (Schmidt et al. 2008). Die Organisatoren werteten die Ergebnisse der Onlinediskussion als ermutigendes Zeichen, dass auch sehr unterschiedliche Sichtweisen auf Synbio im öffentlichen Diskurs verhandelt werden können (Schmidt et al. 2008, S. 16).

*SYBHEL (2008–2012)*

Der Fokus des EU-Projekts »SYBHEL«[124] (koordiniert vom britischen Centre for Ethics in Medicin, University of Bristol) lag auf Anwendungen der Synbio im medizinischen und gesundheitlichen Bereich. In diesem Rahmen wurde die ethische und gesellschaftliche Relevanz der Synbio ebenso untersucht wie rechtliche und regulatorische Fragen. Ziel des Projekts war neben der Forschung auch die Vernetzung von Forschern und Entscheidungsträgern aus Politik und Verwaltung, die durch mehrere Expertenworkshops erreicht wurde. In »SYBHEL« wurden dabei auch Grenzen des ELSI-Ansatzes in der TA-Forschung aufgezeigt, da sich Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Synbio nur mit hoher Ungewissheit treffen ließen. Daher sollte sich die Begleitforschung intensiver um die Einbeziehung der Synbio-Forscher sowie der breiteren Öffentlichkeit in die Abschätzung zukünftiger Auswirkungen bemühen (Douglas/Stemerding 2014).

*Synth-Ethics (2009–2011)*

Bei diesem EU-Projekt[125] (koordiniert von der niederländischen Technischen Universiteit Delft [TUD]) ging es insbesondere um Fragen der Biosicherheit (Biosafety und Biosecurity) sowie um ethische Implikationen des Lebensbegriffs der Synbio. Bei der Erhebung der ethischen und regulatorischen Aspekte wurden auch Stakeholder mithilfe von Befragungen und Gruppendiskussionen einbezogen. Außerdem wurden der Diskurs in den Massenmedien sowie der politische Diskurs analysiert und eine öffentliche Podiumsdiskussion mit Stakeholdern aus Industrie und Zivilgesellschaft veranstaltet. Das Projekt formulierte Empfehlungen für die zukünftige Governance der Synbio in Europa, die sich insbesondere an die Europäische Kommission sowie die für die Regulierung zuständigen Institutionen richteten.

*Global Ethics in Science and Technology (2011–2014)*

Um die Rolle von Ethik in der Wissenschafts- und Technologiepolitik im globalen Rahmen ging es beim EU-Projekt »Global Ethics in Science and Technology« (GEST)[126] (koordiniert von der britischen University of Central Lancashire). Die Synbio war Gegenstand einer von drei Fallstudien, in denen ethische Debatten und philosophische Aspekte der Synbio in Europa, China und Indien vergleichend untersucht wurden.

123 www.synbiosafe.eu/DVD/Review.html (26.11.2015)
124 http://cordis.europa.eu/result/rcn/147536_de.html (23.11.2015)
125 http://synthethics.eu/ (26.11.2015)
126 www.uclan.ac.uk/research/explore/projects/global_ethics_science_technology.php (26.11.2015)

*TA-Projekte von EPTA-Mitgliedsinstitutionen*

Außer dem TAB führten auch mehrere EPTA-Mitgliedsinstitutionen TA-Projekte zur Synbio durch (EPTA 2011): Das STOA beschäftigte sich unter Koordination des Rathenau-Instituuts im Rahmen des Projekts »Making Perfect Life – Bio-engineering (in) the 21st Century« (2010–2012) u. a. mit der Synbio (weitere Beteiligte waren Fraunhofer ISI, ITAS, ITA). Ziel des Projekts war, für das Europäische Parlament ein Monitoring aktueller Entwicklungen zur Konvergenz unterschiedlicher Technologien im Bereich Bioengineering durchzuführen. TA-Projekte wurden außerdem durch das dänische Teknologirådet – Danish Board of Technology Foundation (DBT), das (frühere) flämische Instituut Samenleving en Technologie (IST), das norwegische Teknologirådet – Norwegian Board of Technology (NBT) sowie das französische Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST) durchgeführt.

*Stellungnahme der EGE (2008–2009)*

Die European Group on Ethics in Science and New Technologies (EGE) wurde 1991 als unabhängige Beratungsinstitution der Europäischen Kommission zu ethischen Fragen in Wissenschaft und Technik eingerichtet und besteht derzeit aus 15 von der Kommission ernannten Mitgliedern. Sie wurde 2008 vom EU-Präsidenten zu einer Stellungnahme zu den ELSI-bezogenen Fragen der Synbio aufgefordert. Im Zuge der Bearbeitung der Fragen veranlasste die EGE mehrere Anhörungen von Experten der Synbio- sowie der Begleitforschung und organisierte im Mai 2009 eine öffentliche Diskussionsveranstaltung in Brüssel, an der 70 Teilnehmer aus Wissenschaft, Wirtschaft, nationalen Ethikkommissionen der Mitgliedstaaten, Landwirtschafts- und Verbraucherschutzverbänden sowie Kirchen und anderen Organisationen der Zivilgesellschaft teilnahmen.[127] In ihrer Stellungnahme wies die EGE (2009) auf die Neuheit des Feldes und die daraus resultierende Unklarheit in Fragen der Regulierung hin. Sie empfahl, weitere Forschung zur Risikobewertung der Synbio zu fördern und betonte in Bezug auf die Freisetzung von modifizierten Organismen die Bedeutung des Vorsorgeprinzips. Eine Kennzeichnung von Synbio-Produkten für Konsumenten sollte erwogen werden, für die Regulierung und (insbesondere im Bereich biologischer Waffen) Kontrolle der Synbio sollten europaweit spezifische Rahmenbedingungen geschaffen sowie die Selbstkontrolle der Wissenschaft gestärkt werden. Auch sollte die öffentliche Diskussion über die Synbio gefördert werden, u. a. durch Verbesserung der medialen Kommunikation über Synbio (EGE 2009).

*Stellungnahme des EASAC*

Ähnlich wie einige ihrer Mitgliedsorganisationen veröffentlichte auch der Verbund der Nationalen Wissenschaftsakademien der EU-Mitgliedstaaten (The European Academies Science Advisory Council [EASAC]) eine Stellungnahme zur Synbio (EASAC 2010). Er adressierte als »Stimme der europäischen Wissenschaft« direkt die Politik und untersuchte, wie diese die Forschung zur Synbio verantwortungsvoll fördern könnte. Der EASAC (2010) kam zu dem Schluss, dass keine neuen, Synbio-spezifischen Governancemechanismen für die Gewährleistung von sicherer und verantwortungsvoller Forschung und Entwicklung nötig seien, und sprach sich für eine Stärkung und europaweite Koordination der Förderung der Synbio aus. Er empfahl dabei u. a. die Beibehaltung des Patentregimes der Gentechnik und die weiter gehende Untersuchung der gesellschaftlichen und ethischen Fragen, die durch die Synbio-Forschung aufgeworfen werden.

127 http://ec.europa.eu/archives/bepa/european-group-ethics/archive-activities/activities-2005-2010/index_en.htm (26.11.2015)

*Stellungnahmen der unabhängigen wissenschaftlichen Kommissionen der Europäischen Kommission zur Synbio*

Neben der EFSA sowie der European Medicines Agency (EMA) beraten drei unabhängige wissenschaftliche Ausschüsse die Europäische Kommission in Fragen der Konsumentensicherheit, der Gesundheit und des Umweltschutzes: das Scientific Committee on Consumer Safety (SCCS), das Scientific Committee on Health and Environmental Risks (SCHER) und das Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). Die Ausschüsse wurden 2013 von der Europäischen Kommission gebeten, unter Leitung von SCENIHR Stellung zu drei Fragenkomplexen zu nehmen, die sich auf a) die Eingrenzung und Definition der Synbio, b) die Methodologie und Sicherheit der Synbio und c) Forschungsprioritäten beziehen (SCENIHR 2014). Bei der Beantwortung dieser Fragen griffen die Ausschüsse nicht nur auf die Expertise ihrer – von der Kommission ernannten – Mitglieder und den Stand der Literatur zurück. Sie bezogen auch weitere Experten der Synbio ein und unterzogen die Stellungnahmen jeweils einer öffentlichen Konsultation, bevor diese veröffentlicht wurden. Beim gegenwärtigen Stand (April 2015) wurde die Konsultation zur Stellungnahme zur zweiten Frage abgeschlossen, die erste Stellungnahme wurde inklusive der Konsultationsergebnisse im Juni 2014 veröffentlicht. Auch wenn bei diesen Stellungnahmen die wissenschaftliche Ausrichtung und die wissenschaftlichen Stakeholder im Vordergrund standen, konnten sich weitere Stakeholder über das Konsultationsverfahren mit ihrer Perspektive einbringen. Die Auswertung der Konsultation zur ersten Stellungnahme ergab insgesamt 64 Eingaben von 19 Personen, von denen jeweils sieben einer Behörde beziehungsweise einer wissenschaftlichen Einrichtung angehörten, vier sprachen für Wirtschaftsverbände und eine für das ERASynBio-Netzwerk als Verbund der Förderinstitutionen.[128] Es beteiligten sich also durchaus weitere Stakeholder über den Kreis der Wissenschaftler hinaus, wobei die Zahl eher gering und die Zivilgesellschaft gar nicht vertreten war – allerdings ging es bei der ersten Konsultation zunächst nur um die Frage der Definition der Synbio.

## Fortentwickung der Begleitforschung im europäischen Rahmen: Das RRI-Konzept und seine Umsetzung 2.7

Im Zuge des Übergangs der europäischen Forschungsförderung vom 7. Forschungsrahmenprogramm zum Nachfolger »Horizont 2020« kam es zu grundlegenden Revisionen der Rolle der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung (bis dato »Science in Society«). Nachdem der Status und Umfang der Begleitforschung zunächst unklar waren (Felt et al. 2013), erfuhren entsprechende Aktivitäten durch das übergreifende RRI-Konzept zugleich eine Ausweitung über unterschiedliche Forschungskontexte hinweg, aber auch eine tendenzielle Aufweichung des institutionellen Kerns, der sich aus dem Fokus auf ethische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte ergeben hatte (Forsberg 2014).

### ANLIEGEN UND AUSRICHTUNG VON RRI

Wie die hermeneutische TA propagiert RRI ebenfalls ein frühzeitiges Einsetzen der Begleitforschung, geht in seiner Reichweite aber über diesen Ansatz hinaus. RRI ist in erster Linie ein Ansatz

128 http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/followup_cons_synbio_en.pdf (26.11.2015)

der Governance von Forschung und Innovation, strebt aber auch danach, das Verhältnis von Wissenschaft und Gesellschaft auf eine neue Basis zu stellen. Bezeichnendes Merkmal von RRI ist dabei eine normative Fundierung: Forschung und Innovation sollen nach Werten und Bedarfen ausgerichtet werden, die von der Gesellschaft vorgegeben werden. Forschung und Innovation werden als wesentliche Elemente der gesellschaftlichen Entwicklung betrachtet. Forschung und Innovation sollen umfassend gefördert werden, allerdings soll durch begleitende Prozesse sichergestellt werden, dass sie an den übergreifenden gesellschaftlichen Zielvorstellungen ausgerichtet werden. Worin diese Zielvorstellungen und Werte genau bestehen, soll durch den Prozess von RRI geklärt werden (Owen et al. 2012 u. 2013). Als grundlegender Werterahmen werden zuweilen der Vertrag über die Europäische Union sowie die Grundrechtscharta der Europäischen Union genannt (Schomberg 2012, S. 42; Sutcliffe 2011, S. 9). Doch jenseits solcher abstrakten Grundlagen wird schnell klar, dass es in Bezug auf Forschung und Innovation zu Wertekonflikten kommen kann, beispielsweise zwischen der Forschungsfreiheit und der Ausrichtung auf ökonomisches Wachstum bzw. Nachhaltigkeit oder beispielsweise zwischen unterschiedlichen Gesellschaftsbildern und Entwicklungsstrategien.

Es geht RRI also bei der Ausgestaltung von Forschungs- und Innovationsprozessen um die stärkere und frühzeitige Adressierung sozialer, ökonomischer und ökologischer Herausforderungen unter Berücksichtigung bestimmter ethischer Prinzipien und normativer Ziele. Eine verbreitete Definition umfasst sowohl prozedurale (Transparenz, Interaktivität bzw. Responsivität) als auch substanzielle Merkmale (Ethik, Nachhaltigkeit) (Schomberg 2012, S. 50): »Responsible research and innovation is a transparent, interactive process by which societal actors and innovators become mutually responsive to each other with a view on the (ethical) acceptability, sustainability and societal desirability of the innovation process and its marketable products (in order to allow a proper embedding of scientific and technological advances in our society).«

Damit zielt RRI zwar im Kern auf die Governance von Forschung und Innovation, verschiebt die Zuständigkeit dafür aber aus dem politischen in den gesellschaftlichen Bereich. Politische Regulierung und auch die arbeitsteilig zwischen Politik und TA-Organisationen organisierte Begleitforschung werden zwar als wichtige Bestandteile des Rahmenkonzepts beibehalten, gleichzeitig verweisen die Protagonisten aber auf die Notwendigkeit, diese in eine gesamtgesellschaftliche, auf verschiedenen Ebenen ansetzende Befassung mit Fragen der gesellschaftlichen Wünschbarkeit von Forschung und Innovation einzubetten. Ziel ist, Agenden für Risikoabschätzung zu entwickeln, die »socially robust« sind (Stilgoe et al. 2013, S. 1570).

Wie die hermeneutische TA gründet RRI auf der Betrachtung von Forschung und Innovation als hochgradig relevant für die heutige Gesellschaft, wird dabei aber auch in hohem Maße durch Unsicherheit bezüglich der Auswirkungen geprägt. Dabei spielt eine grundsätzliche Skepsis bezüglich der Steuerungsmöglichkeiten der politischen Institutionen ebenso eine Rolle wie das Collingridge-Dilemma (Owen et al. 2013, S. 33), aber auch die Annahme, dass sich Auswirkungen möglicherweise erst im globalen Maßstab beziehungsweise erst bei nachfolgenden Generationen zeigen und ihre Abschätzung daher mit großer Unsicherheit verbunden ist. Gerade bei neuen, emergierenden Technologien wie der Synbio gebe es keine Präzedenzfälle oder Erfahrungen, an denen sich die technologische Entwicklung ausrichten könne. Die Arbeitsteilung zwischen Innovation auf der einen und der Abschätzung ihrer möglichen Folgen auf der anderen Seite habe sich in vielen Fällen nicht bewährt, weil wichtige Folgen z. T. zu spät gesehen bzw. anerkannt wurden (Owen et al. 2013,

S. 33).[129] Die zunehmende Auflösung von Grenzen wie beispielsweise zwischen Forschung und Anwendung (transdisziplinäre Forschung), aber auch zwischen den etablierten wissenschaftlichen Disziplinen (interdisziplinäre Forschung) trage weiter dazu bei, dass sich Wissen über zukünftige Entwicklungen und Auswirkungen von FuE-Prozessen schwerer gewinnen lässt als bei Innovationen, deren Anwendungsgebiet klar abgrenzbar und gut erfassbar ist.

RRI bezieht sich in vieler Hinsicht auf die TA als Vorläufer bzw. integraler Bestandteil von Maßnahmen zur Governance neuer Technologien und hebt deren Verdienste hervor. Daneben geht das Konzept aber über TA hinaus, indem der Gegenstandsbereich auf grundsätzlichere Fragen wünschenswerter zukünftiger Innovationen ausgedehnt wird und das Gewicht der Experten in der TA durch eine stärkere Berücksichtigung auch von Laien ergänzt werden soll. RRI kann insofern als eine Fortentwicklung der Begleitforschung zu FuE-Prozessen verstanden werden, die stärker auf Governance und die gesellschaftliche Einbettung von Innovation abstellt, in ihrer Umsetzung aber zu großen Teilen auf TA-Methoden beruht (Oudheusden 2014; Zwart et al. 2014)

RRI wendet sich gegen einseitig auf die Risiken und negative Folgen gerichtete Begleitforschung und plädiert für ein symmetrisches Vorgehen, das sich auf wünschenswerte Zukünfte richtet, zu denen Forschung und Innovation einen Beitrag leisten sollen. Die Rolle von Wissenschaft und Innovation für die Gestaltung der Zukunft wird dabei explizit betont. Entsprechend stellen nicht allein die Auswirkungen von Innovationen einen Gegenstand für RRI dar, sondern auch die Motivationen und Ziele, auf deren Basis Innovationsprozesse initiiert und vorangetrieben werden. Durch einen stärkeren Diskurs zwischen Forschern, Entwicklern und gesellschaftlichen Akteuren sowie durch eine verstärkte Ausrichtung der Ausbildung auch auf normative Fragestellungen sollen zwar nicht individuelle Motivationen direkt beeinflusst werden, wohl aber die gesellschaftlichen Ziele von Wissenschaft und Innovation stärker ins Bewusstsein gerückt und damit indirekt wirksam werden (beispielsweise über Sozialisationseffekte bzw. institutionelle Veränderungen).

Diese als »reflexiv« charakterisierte Ausrichtung wird begleitet durch das Ziel von RRI, zukünftige Entwicklungen nicht einzuengen, sondern aktiv die Möglichkeitsräume auszuweiten. »Antizipierende« Methoden sollen dabei helfen, erwünschte und unerwünschte Entwicklungen vorherzusehen und Alternativen zu entdecken. Beiträge zu solchen Abschätzungen sollen dabei nicht allein von Experten kommen, sondern in inklusiven, »deliberativen« Verfahren wie Dialogen, Beteiligungsverfahren und Debatten unter Beteiligung der Öffentlichkeit und verschiedener Stakeholder erstellt werden. Auf diese Weise sollen ein breiteres Wissen, aber auch unterschiedliche Werte- und Bedeutungsrahmen Eingang in die Steuerung von Forschung und Innovation finden. Außerdem soll sich auf diese Weise ein Gefühl der gemeinschaftlichen Verantwortung für Forschung und Innovation, im positiven wie negativen Sinn, einstellen (»collective responsibility«, Owen et al. 2013, S. 30; »co-responsibility«, Schomberg 2012, S. 54). Nicht zuletzt sollen institutionelle Arrangements gefunden werden, die den Prozess der Technikentwicklung »responsiv« machen, also für stetige Rückkopplungen zwischen dem Fortschritt der Entwicklung und seiner Reflexion sorgen. Auf konzeptioneller Ebene lässt sich die Ausrichtung von RRI somit mit den vier Dimensionen der Reflexivität, der Antizipation, der Deliberativität und der Responsivität bestimmen.

RRI erhebt aber über die konzeptionelle Ebene hinaus den Anspruch, Forschung und Innovation praktisch anzuleiten. Wie eine Umsetzung von RRI konkret erfolgen soll, ist dabei noch weitgehend

129 Owen et al. (2013) verwiesen dabei u. a. auf Beispiele wie den sauren Regen infolge von Schwefeldioxidemissionen sowie die Umwelteffekte von Tributylzinnhydrid in Schiffslackierungen (siehe auch EEA 2002).

offen. Dabei stellen sich u. a. die Fragen, in welchen Bereichen RRI sinnvollerweise angewendet werden solle, wie RRI im Lern- und Bildungsbereich ansetzen könne, um die Voraussetzungen für verantwortungsvollen Umgang der Forschenden zu fördern, wie die Arbeitsteilung zwischen Wissenschaftlern und Innovatoren, der Politik und weiteren Institutionen der Governance von Forschung (beispielsweise der Forschungsförderung) zugunsten einer gemeinsamen Verantwortung (»co-responsibility«) aufgelöst werden kann und wie RRI als kontinuierliche, nachhaltig weiterentwickelte Praxis etabliert werden könne (Owen et al. 2013).

Trotz dieser noch ungelösten Fragen entfaltet das Konzept bereits Wirkungen, insbesondere durch erste Schritte einer großflächigen Umsetzung, welche die Europäische Kommission im Rahmen ihrer Forschungsförderungsprogramme vorgegeben hat. Aufbauend auf die Erklärung von Lund (2009), in der Forschung und Entwicklung auf die Lösung der »grand societal challenges« ausgerichtet werden, wurde seit 2011 die konzeptuelle Entwicklung von RRI durch die Generaldirektion für Forschung und Innovation der Europäischen Kommission vorangetrieben (Owen et al. 2012). Nachdem erste Schritte zunächst versuchsweise im 7. Forschungsrahmenprogramm erfolgten und die Rolle der Begleitforschung im europäischen Forschungsrahmenprogramm grundsätzlich überdacht wurde, wurde es im aktuellen Horizont-2020-Forschungsrahmenprogramm auf breiterer Ebene in konkrete Maßnahmen überführt, die ganz unterschiedliche Phasen von Forschung und Innovation, auch im Bereich Synbio, betreffen.

So wurden im Rahmen des Projekts »View, Opinions and Ideas of Citizens in Europe on Science« (VOICES) im Jahr 2013 in allen 27 Ländern der Europäischen Union öffentliche Konsultationen zur Priorisierung von Themen für die Forschungsförderung der Europäischen Kommission durchgeführt. Die Ergebnisse sollen nicht nur öffentlich als »open data« zur Verfügung gestellt werden, sondern die Kommission hat sich auch verpflichtet, sie in den formellen Prozess der Formulierung von Prioritäten der Forschungsförderung einzubeziehen. Neben dieser Umsetzung im Rahmen des Agendasettings wurden außerdem im 7. Forschungsrahmenprogramm Projekte zur (Weiter-)Erkundung und Entwicklung von RRI und entsprechenden Methoden gefördert (z. B. das Projekt »RRI Tools«[130]) sowie Projekte zu unterschiedlichen technologischen Herausforderungen, die das Instrument des »Mobilisation and Mutual Learning Action Plan« (MMLAP) erproben und verbreiten sollen. Beim MMLAP handelt es sich nicht um Forschungsprojekte, sondern um Projekte zur Vernetzung einer großen Zahl unterschiedlicher Stakeholder (Wissenschaft, Wirtschaft, Zivilgesellschaft, Wissenschaftsvermittler, Politik) mit dem Ziel, diese in einen langfristigen Dialog über Ausrichtung und Weiterentwicklung ausgewählter Wissenschafts- und Technologiefelder einzubinden. Ein solcher MMLAP, das Projekt »SYNENERGENE«, wurde 2013 zum Thema Synthetische Biologie eingerichtet.[131]

### DAS PROJEKT »SYNENERGENE« ALS ERPROBUNG VON RRI IM BEREICH SYNBIO

In »SYNENERGENE« widmen sich insgesamt 27 Partnerorganisationen dem Ziel, die öffentliche Debatte über Synthetische Biologie zu fördern und wechselseitige Lernprozesse zwischen unterschiedlichen Stakeholdern zu ermöglichen (das Projekt wird von ITAS koordiniert). Die im Projekt involvierten Organisationen kommen hauptsächlich aus dem Bereich der TA. Darüber hinaus sind

130 www.rri-tools.eu (26.11.2015)
131 http://synenergene.eu (26.11.2015)

Forschende auf dem Gebiet der Synbio und Synbio-Unternehmen eingebunden, ebenso wie Experten in Beteiligungsverfahren und Wissenschaftsvermittlung (u. a. das European network of science centres and museums [Ecsite]), Künstler, DIY-Biologen sowie NRO, die sich mit Synbio befassen. Diese breite Basis entspricht dem Konzept von MMLAP als einer gemeinsamen Aktivität besonders vieler und möglichst unterschiedlicher Partner, die mit dem betreffenden Gebiet befasst sind. Sie wird noch erweitert durch die sogenannten »offenen Foren«, über die interessierte Organisationen außerhalb des Projektkonsortiums an den Aktivitäten in »SYNENERGENE« beteiligt werden. Aktuell werden solche offenen Foren für Akteure aus den Bereichen Zivilgesellschaft, Wirtschaft, Wissenschaft, Politik sowie Medien angeboten.

Ein zweites Merkmal von MMLAP ist die Verbindung von Lernprozessen unter den Partnern (»mutual learning«) mit der Ausstrahlung nach außen in die Gesellschaft hinein (»mobilisation«). Die Basis dafür bilden die internen Lernprozesse durch den Erfahrungsaustausch zwischen den Partnern über methodische und substanzielle Fragen der Bewertung der Synbio in Form von gemeinsamen Workshops und Erfahrungsberichten. Mithilfe einer Vielzahl von Aktivitäten (in »SYNENERGENE« sind ca. 100 Aktivitäten über einen Zeitraum von vier Jahren geplant) werden diese Erfahrungen und die Ergebnisse der internen Lernprozesse mit Akteuren unterschiedlicher Stakeholdergruppen geteilt. Die Aktivitäten umfassen etwa Beteiligungsverfahren wie öffentliche Dialoge zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit, Workshops zwischen politischen Entscheidungsträgern, Wissenschaftlern und TA-Experten sowie Onlinebeteiligungsverfahren, aber auch die Entwicklung und Einführung von Materialien für den schulischen Unterricht und von Ausstellungsgegenständen für die »Science Center« sowie die Förderung künstlerischer Auseinandersetzungen mit der Synbio durch Artist-in-Residence-Programme und Film- und Theaterfestivals.

*Beispiel öffentlicher Dialog*: In Ergänzung zu einer Fachtagung der Synbio im Rahmen der »Helmholtz-Initiative Synthetische Biologie« organisierte »SYNENERGENE« gemeinsam mit der Forschungsstätte der Evangelischen Studiengemeinschaft Heidelberg e. V. (FEST) eine öffentliche Expertendiskussion zu gesellschaftlichen Aspekten der Synbio (Heidelberg, 9.12.2013; Kap. V.2.5). Auf diese Weise wurden sowohl die interessierte (lokale) Öffentlichkeit als auch die Fachwissenschaftler über den Stand der Diskussion dieser Aspekte informiert und konnten sich in die Diskussion einbringen. Durch die Kooperation mit einer zivilgesellschaftlichen Organisation des kirchlichen Bereichs sowie die Verbindung der Podiumsdiskussion mit einer Kunstausstellung der Bioarts wurden außerdem Kontakte zu weiteren Stakeholdern aufgebaut und deren Perspektive einbezogen. Als weitere Bestandteile des öffentlichen Dialogs wird durch das Projekt u. a. der Betrieb einer Onlineplattform für zivilgesellschaftliche Perspektiven auf die Synbio unterstützt,[132] des Weiteren ist ein onlinegestütztes Bürgergutachten zur Synbio geplant, das europäische und US-amerikanische Perspektiven widerspiegeln soll.

*Beispiel Workshop mit Entscheidungsträgern*: Im Oktober 2014 veranstaltete das WWICS im Rahmen von »SYNENERGENE« eine sogenannte Handelszone (»trading zone«). Dabei handelt es sich um einen Workshop, bei dem politische Entscheidungsträger, Synbio-Experten, Vertreter von Unternehmen und NRO sowie Begleitforscher aus den USA und Europa zusammentrafen, um die Konsequenzen einer bestimmten Synbio-Anwendung für die Gesellschaft zu durchdenken und entsprechende Eingriffsoptionen und -notwendigkeiten zu diskutieren. Auch wenn der Workshop nicht öf-

132 www.synbiowatch.org (26.11.2015)

fentlich durchgeführt wurde, zielte er dennoch auf eine breite Wirkung, da die erarbeiteten Ergebnisse von den Beteiligten unmittelbar in ihre Arbeit im Bereich der Synbio übernommen werden konnten. Während der Schwerpunkt dieser »trading zone« auf dem transatlantischen Austausch lag, wurden ähnliche Workshops mit Schwerpunkten auf der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie (Darmstadt, Juni 2014) durchgeführt bzw. sind für die Zukunft geplant.

*Beispiel Theaterprojekt*: Nachdem bereits im Oktober 2014 das BIO·FICTION Science Art Film Festival in Wien mit einem Symposium, DIY-Biologieworkshops sowie einer Bioartausstellung stattgefunden hatte (Kap. V.1.3), erarbeitete das Theater Freiburg gemeinsam mit dem Institut für Ethik und Geschichte der Medizin der Universität Freiburg und der französischen Université Paris I Panthéon-Sorbonne eine Inszenierung zum Thema Synbio, die im Juli 2015 aufgeführt wurde. Eingebettet in das Spielzeitthema »Vom Homo Faber zum Homo Creator« schufen die Künstler gemeinsam mit Wissenschaftlern und Studierenden theatralische Szenen und Performances, die von diesen (Theater-)Laien im Rahmen eines interaktiven, partizipativen Themenkongresses aufgeführt wurden. Das Theater Freiburg konnte dabei auf Erfahrungen mit einem ähnlich angelegten Projekt zum Thema »Optimierung des menschlichen Gehirns« zurückgreifen, das in den Jahren 2008 und 2009 durchgeführt worden war. Weitere theatrale Auseinandersetzungen mit der Synbio sind im Projekt »SYNENERGENE« auch in Großbritannien geplant, wo Experten des Centre for Public Engagement (CPE) der University of Bristol gemeinsam mit Künstlern eine Inszenierung entwickeln. Diese soll in britischen Schulen gezeigt werden und die Schüler zur Diskussion über die Synbio anregen.

*Beispiel öffentliche Wissenschaftsvermittlung*: Das Projektkonsortium von »SYNENERGENE« besteht nicht nur aus einzelnen Institutionen, sondern auch aus Netzwerken mit vielen Partnerorganisationen, um europaweite Multiplikationseffekte bereits innerhalb des Projekts zu erzielen. Ecsite ist ein solcher Netzwerkpartner. Gemeinsam mit den anderen Partnern erarbeiten die teilnehmenden Science Center in Spanien, Portugal, Italien, den Niederlanden, Polen, Estland sowie Brasilien Experimente und Aktivitäten zur Vermittlung von Wissen über die Synbio und zur Reflexion der damit verbundenen Möglichkeiten und Grenzen. Dazu gehört neben den konkreten Veranstaltungen auch die Erstellung von Materialien, die in den Science Centern, aber auch in Schulen weiter genutzt werden können. Ein Beispiel für die Arbeiten ist der Themenschwerpunkt zur Synbio, den das niederländische Science Center NEMO auf dem Wissenschaftsportal »Kennislink.nl« unterhält. Diese als Wissensbasis (»knowledge base«) konzipierte Ressourcensammlung umfasst Berichte, Interviews sowie Filme. Außerdem werden über das Portal auch Onlinediskussionen zu Einzelaspekten der Synbio geführt. Dieses Beispiel zeigt, wie die Science Center und Museen des Ecsite-Netzwerks ihre Erfahrung in der Vermittlung wissenschaftlicher Themen und ihre lokale und kulturelle Expertise zur Diskussion lebenswissenschaftlicher Themen innerhalb des MMLAP einbringen. Es zeigt außerdem, wie diese Institutionen der Wissenschaftsvermittlung dabei helfen, das Thema Synbio in der Öffentlichkeit präsenter zu machen und den Zugang zu ihren Zielgruppen ermöglichen, die breite Gruppen der Bevölkerung und insbesondere Kinder und Jugendliche umfassen.

Die Arbeit des MMLAP »SYNENERGENE« muss als realweltliches Experiment mit offenem Ausgang angesehen werden, da fundamentale Fragen von RRI bislang noch nicht geklärt sind, etwa die Frage der grundsätzlichen Möglichkeit einer Beeinflussung von Forschung und Innovation im Sinne gesellschaftlicher Werte und Ziele oder wie sich eine gesellschaftliche Perspektive in der Praxis mit den Motivationen und Orientierungen der Forschenden und Innovatoren verbinden lässt. Dazu wer-

den nicht nur neue Formate der TA und der gesellschaftlichen Beteiligung entwickelt und ausprobiert, sondern die Erfahrungen mit diesen Formaten werden durch Evaluationen und durch den regelmäßigen wechselseitigen Erfahrungsaustausch der Partner untereinander sowie mit anderen MMLAP systematisch ausgewertet, um auf diese Weise das Instrument der MMLAP weiterzuentwickeln.

**WEITERENTWICKLUNGEN UND KRITIK DES KONZEPTS RRI**

RRI wird im aktuellen Forschungsrahmenprogramm nicht nur durch gesonderte Projekte umgesetzt, sondern großflächig eingebettet als Teil der eigentlichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. So fordert die Europäische Kommission in ihrer Ausschreibung für Forschung im Bereich Synthetische Biologie (H2020-LEIT-BIO-2014-1),[133] dass die Projekte Risikobewertungen sowie die Berücksichtigung von Auswirkungen in ethischer und sozialer Hinsicht, aber auch mit Blick auf geistige Eigentumsfragen, als »integrale Bestandteile« beinhalten müssen und sich dazu mit RRI-bezogenen Aktivitäten der Begleitforschung vernetzen sollen. Mit einem solchen Schritt, der in Horizont 2020 auch für andere Forschungs- und Technologiebereiche erfolgt ist, setzt die Europäische Kommission das Konzept von RRI hinsichtlich der Stärkung von gemeinsamer Verantwortlichkeit zumindest als Anforderung an zukünftige Forschungs- und Innovationsprozesse um. Allerdings bleibt hier, wie auch bereits beim Instrument der MMLAP, die konkrete Ausgestaltung den jeweiligen Akteuren freigestellt. Außerdem konkurriert bei einer solchen Paketlösung von eigentlicher Forschung und Begleitforschung das Kriterium der Implementierung von RRI möglicherweise mit anderen für die Beurteilung der Projektanträge relevanten Kriterien. So ist unklar, ob ein Projekt mit herausragendem Ansatz der Begleitforschung, das aber weniger innovativ ist als ein Projekt mit nur mittelmäßigem Begleitforschungskonzept, eine Chance auf Förderung hätte.

In den Niederlanden sowie in Großbritannien und den USA bestehen vergleichbare Förderprogramme zur Synbio, bei denen FuE-Projekte nur im Verbund mit Maßnahmen der Begleitforschung gefördert werden. Das entsprechende Programm in den Niederlanden unter dem Titel »Verantwortungsvolle Innovation« wurde 2008 von der Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) eingerichtet und ist nicht spezifisch auf Synbio ausgerichtet. In ausgewählten Forschungs- und Technologiebereichen können multidisziplinäre Projekte beantragt werden, die langfristig zu neuen Produkten führen sollen und bei denen ethische und soziale Aspekte eine große Rolle spielen.[134] In diesem Fall geht die Ausrichtung auf RRI-Aspekte bereits in die Definition der Fragestellungen möglicher Projektanträge ein. In Großbritannien wurden seit 2007 Forschungsnetzwerke zur Synbio nur unter der Bedingung gefördert, dass sie auch ELSI-Aspekte durch eine entsprechende interdisziplinäre Zusammensetzung abdecken (Calvert/Martin 2009, S. 202). In der Synbio-Roadmap wird Großbritannien als weltweit führend im Erproben solcher multidisziplinärer Kooperationen bezeichnet (UK Synbio Roadmap Coordination Group 2012, S. 19). Auch im CSynBi sind die Sozialwissenschaften ein Bestandteil (»integral part«),[135] ebenso bei den 2015 neu finanzierten Forschungszentren.[136] Durch die Verankerung der interdisziplinären Zusammenarbeit auf

---

133 http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/main/h2020-wp1415-leit-nmp_en.pdf (26.11.2015)

134 www.nwo.nl/en/funding/our-funding-instruments/gw/responsible-innovation/responsible-innovation.html (26.11.2015)

135 www.imperial.ac.uk/synthetic-biology/csynbi/research (26.11.2015)

136 www.theguardian.com/science/political-science/2015/jan/30/uk-synthetic-biology-centres-tasked-with-addressing-public-concerns (26.11.2015)

der Ebene von Netzwerken und Zentren, nicht aber von einzelnen Forschungsprojekten, vermeidet das britische Modell Konflikte, wie sie beim Modell der Europäischen Kommission mit Entscheidungen über einzelne Förderanträge entstehen können. Dennoch entsteht in Großbritannien offenbar eine enge Zusammenarbeit über die Disziplinen hinweg, wie der Erfahrungsbericht von Calvert/Martin (2009) belegt (vgl. auch Felt et al. 2013, S. 22). In den USA schließlich wurde die Begleitforschung als Forschungsprogramm unter dem Namen »Human Practices« im Rahmen des nationalen Synthetic Biology Engineering Research Center (Synberc) institutionalisiert und dadurch ebenfalls eng an die Synbio-Forschung angebunden und verbindlich gemacht (Rabinow/Bennett 2009). Allerdings scheiterte diese Zusammenarbeit zwischenzeitlich am Konflikt zwischen den Sozialwissenschaftlern und den sonstigen Forschern und der Leitung des Zentrums (Gollan 2011), was zu einer Anpassung des Programms und einer Änderung des Namens zu »Policy and practices« führte. In modifizierte Form wird die Zusammenarbeit am Synberc bis heute weitergeführt (Costa 2014).

Während das Konzept von RRI durch diese Maßnahmen sowie durch den Diskurs innerhalb der Gemeinschaft der Forschenden Wirkung entfaltet, lässt sich über die tatsächliche Neuheit der Ideen von RRI streiten. Die Protagonisten (Owen et al. 2012; Schomberg 2012) wiesen selbst immer wieder darauf hin, dass das Konzept auf Vorläufern wie »midstream modulation«, also der Beeinflussung der Forschungs- und Entwicklungspraxis (Fisher et al. 2006), »anticipatory governance« und auch TA beruht. Der Gedanke einer responsiven Technikentwicklung aber, also der stetigen Kontrolle der Ziele der Innovation im Prozess ihrer Verwirklichung, erinnert an noch ältere Konzepte wie das der Fehlerfreundlichkeit (Weizsäcker/Weizsäcker 1984) aus den 1970er Jahren, die für die Gestaltung von Technologien bedeutet, dass Fehler als grundsätzlich möglich einkalkuliert werden und deshalb keine katastrophalen Auswirkungen haben dürfen. Auch Zwart et al. (2014) sowie Oudheusden (2014, S. 72) verweisen auf die Kontinuität zu bisherigen Ansätzen der Begleitforschung. RRI stelle gegenüber ELSI eher eine Neuausrichtung der Begleitforschung als einen grundsätzlich neuen Ansatz oder eine neue Methode dar.

Die Diskussion um das Konzept von RRI wird bislang vor allem durch die Protagonisten geprägt sowie durch Versuche, das Konzept näher zu beschreiben und seine Bezüge zu bestehenden Governanceformen herauszustellen. Eine kritische Auseinandersetzung findet bisher nur in Ansätzen statt. Eine grundsätzliche Kritik, die sich zwar nicht explizit gegen RRI richtet, wohl aber gegen eine »De-mokratisierung der Wissenschaft«, die von der »Exekutive und Legislative« in Brüssel vorangetrieben werde, formulierte der damalige Präsident der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Günter Stock. In seiner Rede zum Leibniztag 2014 gab er der Sorge Ausdruck, dass die Freiheit der Forschung bedroht sei, wenn »gesellschaftlich relevante Gruppen« zu viel Einfluss auf die Entscheidungen über die Förderung von Forschungsprojekten gewännen.[137] Dabei könnten etwa kurzfristige politische Kämpfe die wissenschaftliche Entwicklung negativ beeinflussen, wobei er auf die Erfahrungen der deutschen Geschichte verwies. Diese Kritik weckt Erinnerungen an die aus marktwirtschaftlichen Überlegungen abgeleitete Idee einer starken Forschungsfreiheit, wie sie Polanyi (1951) formulierte. Allerdings ist klar, dass Freiheiten immer dort an Grenzen stoßen, wo andere Freiheiten bzw. Grundwerte bedroht werden. Lee/Petts (2013, S. 150) etwa verwiesen in Bezug auf RRI darauf, dass Eingriffe in die Marktfreiheit gerechtfertigt und notwendig sind, wenn risikobedingte Kosten gegebenenfalls durch die Innovatoren externalisiert wer-

137 www.bbaw.de/veranstaltungen/2014/juni/bericht-praesident-2014 (26.11.2015)

den können und damit nicht mehr in das ökonomische Kalkül eingehen. Der Blick auf marktwirtschaftliche Rahmenbedingungen macht außerdem deutlich, dass Forschung und Innovation bereits insofern stark durch gesellschaftliche Gruppen beeinflusst sind, als ein Großteil der entsprechenden Aufwendungen aus dem privaten Sektor stammt (Sukhdev 2012). Für gestaltende Eingriffe bieten sich insofern eher die Rahmenbedingungen von Forschung und Innovation an als spezifische thematische Forschungsagenden.

Die Sorge vor einem zu weit gehenden Eingriff in die Wissenschaft mag aber auch durch die Unschärfe des Konzepts von RRI begründet sein, das nicht genau klarstellt, in welchem Ausmaß und in welcher Form sich Forschung und Innovation an gesellschaftlichen Werten und Zielen auszurichten haben. Diese Ungenauigkeit des Konzepts wird vielfach kritisiert (Davis/Laas 2014, S. 968; Grunwald 2013, S. 36; Wickson/Carew 2014, S. 256). Außerdem richten sich einige Kritiker gegen eine aus ihrer Sicht zu starke Ausrichtung des Konzepts auf wirtschaftliche Innovationen. Dabei vermissten Davis/Laas (2014, S. 968) die Berücksichtigung von wissenschaftlichen Erkenntnissen der Grundlagenforschung, die auch ohne unmittelbar in Produkte zu münden einen Wert für die Gesellschaft in Form von Wissenszuwachs haben könnten (ähnlich auch Hove et al. 2012). Zwart et al. (2014) betonten, dass RRI den Fokus der Begleitforschung stärker auf die ökonomische Inwertsetzung verschiebe, als dies zuvor unter dem Begriff der Untersuchung ethischer, juristischer und sozialer Implikationen (ELSI) von Forschung und Innovation geschehen sei.

Darüber hinaus richtet sich Kritik auf die nur oberflächlichen Anmerkungen zur konkreten Umsetzung von RRI in die Praxis. Oudheusden (2014) verwies darauf, dass jede Art von Partizipationsverfahren Fragen der Machtverteilung tangiere und ihre Ausgestaltung in hohem Maße darüber entscheide, ob die mit ihnen verbundenen Ziele erreicht werden. So könnten sich gesellschaftliche Gruppen unter Umständen ausgeschlossen fühlen oder politische Repräsentanten die Legitimation der Teilnehmenden anzweifeln, da diese nicht durch das formale Verfahren einer Wahl bestimmt wurden (Oudheusden 2014, S. 72). Auch Rip (2014) richtete den Blick auf die Probleme der praktischen Umsetzung von RRI, die meist reduktionistisch gegenüber dem ursprünglichen Konzept sei. So werde RRI vor allem im Bereich neuer und emergierender Technologien eingesetzt, also in einem sehr frühen Stadium des Innovationsprozesses, häufig mit dem Ziel, Akzeptanz für diese zu schaffen, wohingegen die relevanteren Probleme häufig in späteren Phasen der Innovation bestünden (Rip 2014, S. 9). Außerdem befürchtete Rip (2014), dass sich trotz des Fokus von RRI auf ethische und gesellschaftliche Fragen in der praktischen Umsetzung Fragen des Risikos in den Vordergrund drängen und den Fokus verengen würden, weil sie leichter zu bearbeiten seien – ein Vorwurf, der allerdings kaum auf die Synthetische Biologie gerichtet sein dürfte, bei der (bislang) ethische und gesellschaftliche Fragen mehr Raum in der Begleitforschung einnehmen als Risikoabschätzungen.

**RRI ALS NEUE STUFE DER BEGLEITFORSCHUNG?**

Zusammenfassend kann neben der ungenauen und vor allem theoretisch orientierten Ausgestaltung des Konzepts von RRI vor allem kritisiert werden, dass das Konzept in weiten Teilen die bereits etablierte Praxis der Begleitforschung durch TA und andere Verfahren beinhaltet und dass ansonsten die kritische Diskussion des Konzepts zugunsten einer vorwiegend positiven Aufnahme vernachlässigt wurde. Seit Längerem werden in der TA und der Forschungspolitik Ideen diskutiert, wie sich neue, emergierende Technologien in Anbetracht der mit ihnen verbundenen hohen Ungewissheiten begleiten und fördern lassen (Felt et al. 2013). RRI wurde in engem Zusammenhang mit der

europäischen Forschungspolitik in die Diskussion eingebracht. Auch wenn das Konzept die wissenschaftliche TA-Diskussion aufgreift, findet eine intensive und kritische Auseinandersetzung mit dem Konzept erst in jüngster Zeit statt, während bereits Maßnahmen zur Umsetzung von RRI ergriffen wurden. Insofern lässt sich RRI als Lernprozess verstehen, der an die »partizipative Wende« der TA anschließt (Jasanoff 2003) und diese fortentwickelt. Den praktischen Umsetzungen kommt in dieser Sichtweise die Rolle von realweltlichen Experimenten zu. In der Konsequenz ist dafür zu sorgen, dass die Erfahrungen und Ergebnisse aus diesen Experimenten kritisch und konstruktiv zur Weiterentwicklung von RRI genutzt werden. So ist beispielsweise bislang nicht klar, inwiefern RRI Probleme der partizipativen TA lösen kann, die sich gerade für neue, emergierende Technologien in besonderem Maße stellen:

> Partizipative Diskursaktivitäten müssen in Anbetracht der geringen öffentlichen Wahrnehmung neuer FuE-Entwicklungen organisiert werden. Entsprechend künstlich wirken sie auf die Beteiligten und bringen die Gefahr mit sich, dass ihre Ergebnisse nicht viel mit dem breiteren gesellschaftlichen Diskurs zu tun haben (Bogner 2012).
> Um Personen anzusprechen, die sich nicht bereits mit der Synbio beschäftigen, muss das Thema spezifisch formuliert werden. Bereits die Art einer solchen Rahmung des Themas hat jedoch große Auswirkungen auf die Fragestellungen, die Teilnehmer und die Spielräume einer Diskussion darüber (Torgersen/Schmidt 2013).
> Die Rückbindung der Ergebnisse diskursiver bzw. partizipativer Verfahren an den Entscheidungsprozess, aber auch – wie von RRI intendiert – an den Forschungsprozess, ist häufig nicht in nachvollziehbarer Weise organisiert, so sie denn überhaupt gewährleistet ist. Damit drohen diese Verfahren, die ihnen zugeschriebene legitimationsstiftende und konsenserzeugende Funktion zu verlieren (Bechmann 1997; Marris/Rose 2010).

Während es somit grundsätzlich begrüßenswert scheint (und auch den Empfehlungen der allermeisten Studien zu den Auswirkungen der Synbio entspricht), die Begleitforschung zur Synbio zu intensivieren und auf ein breiteres gesellschaftliches Fundament zu stellen, sind die aktuellen Aktivitäten im Rahmen von RRI zunächst als Experimente anzusehen. Erst die Auswertung der Erfahrungen mit neuen Instrumenten wie der Wissenschaftskommunikation durch beispielsweise Science Center oder der Einbeziehung neuer Perspektiven beispielsweise der Kunst kann zeigen, ob das Ziel einer stärkeren Ausrichtung von Forschung und Innovation an dem gesellschaftlich Wünschenswerten erreicht wird. Auch abgesehen von den anspruchsvollen normativen Vorgaben tragen die unterschiedlichen, für die TA zum Teil neuen, zum Teil bewährten Aktivitäten der Begleitforschung dazu bei, die Synbio aus der Perspektive gesellschaftlicher Werte und Belange zu beobachten und den Diskurs der unterschiedlichen betroffenen und interessierten Akteure zu organisieren.

## Fazit: Mitgestaltung unter Bedingungen des Nichtwissens 3.

Die Notwendigkeit der Weiterführung öffentlicher Diskursaktivitäten zur Synthetischen Biologie wird von den an der Debatte Beteiligten nahezu einhellig betont, oft wird eine Intensivierung befürwortet. Die vorliegenden Bevölkerungsumfragen belegen, dass die Diskussion über die Synbio, ihre Potenziale und Risiken für Gesellschaft und Umwelt bislang vornehmlich von Experten geführt wird und die breitere Bevölkerung kaum involviert ist. Zwar reicht der Kreis der Experten über die unmittelbar an der Synbio Forschenden hinaus und schließt auch Akteure der (Forschungs-)Politik,

der Wirtschaft und der Begleitforschung ein. Doch weder die organisierte Zivilgesellschaft (abgesehen von wenigen, hoch spezialisierten Organisationen) noch die breitere Bevölkerung sind in Deutschland bisher in größerem Maße am Diskurs über die Synbio beteiligt. Berichte über die Synbio sind in den deutschsprachigen Massenmedien durchaus präsent. Die Akteure der Synbio-Forschung sind allerdings zum Teil zurückhaltend in der Nutzung des Begriffs. Insbesondere hat die deutsche Forschungspolitik – im Gegensatz etwa zu den angelsächsischen Ländern – dem Forschungsfeld keine herausgehobene Stellung zugeschrieben. Veranstaltungen zur Einbindung der Öffentlichkeit in die Diskussion wurden zwar organisiert, zielten aber auf ein vergleichsweise kleines, häufig schon informiertes Publikum. Eine naheliegende Ursache ist, dass Produkte der Synbio i. e. S. – und bis auf wenige Ausnahmen auch solche der Synbio i. w. S. – bisher noch keinerlei Berührungspunkte mit dem Markt für Endverbraucher aufweisen.

Eine frühzeitige und umfassendere Beteiligung der breiteren Öffentlichkeit ist angesichts der potenziell weit reichenden Eingriffe der Technologie, der Unsicherheit des Wissens über ihre Folgen und der größeren Einfluss- und Gestaltungsmöglichkeiten in diesem Stadium der Technologieentwicklung dennoch wünschenswert. Doch wie könnte eine stärkere Einbindung der Öffentlichkeit gestaltet werden – vor dem Hintergrund eines offenbar geringen öffentlichen Interesses am Thema, der geringen öffentlichen Wahrnehmbarkeit der Synbio und ihrer Folgen, der Schwierigkeit, das ausgesprochen heterogene Feld einzugrenzen, sowie der etablierten Konfliktlinien der Bioethik und des Umweltschutzes, die kaum Raum für das Entstehen eines Diskurses im eigentlichen Sinn des Wortes lassen? Auch wenn sich diese Frage nicht allgemein beantworten lässt, lassen sich auf Basis der bisherigen Erfahrungen und Erkenntnisse im Bereich der partizipativen TA doch Anhaltspunkte formulieren, an denen sich Aktivitäten zur Förderung des öffentlichen Diskurses über die Synbio orientieren können.

Die Ziele von Diskursaktivitäten sollten frühzeitig festgelegt und transparent kommuniziert werden. Eine Steigerung der Akzeptanz von bestimmten Anwendungen der Synbio ist zwar denkbar als Ziel, steht jedoch im Widerspruch zur Offenheit des Ergebnisses, die eine wichtige Grundlage von Beteiligungsverfahren ist. Ein möglicher Anspruch an Partizipation muss dabei gut begründet und belegt sein, um Irritationen, zumindest aber Enttäuschungen bei den Beteiligten vermeiden zu können. Als realistisches Ziel kann zunächst gelten, dass sowohl Forschende als auch Vertreter der Zivilgesellschaft ihre Sicht auf die Synbio deutlich machen können und die Perspektive der anderen Akteure anerkennen. Auf diese Weise ist die Voraussetzung für einen wechselseitigen Lernprozess geschaffen, wie er im weiteren Diskursverlauf stattfinden kann (EC 2007, S. 59 f.). Die Motivation zur Beteiligung an einer solchen reflektierten Auseinandersetzung mit der Synbio kann gesteigert werden, indem verbindliche Anschlussmöglichkeiten für die daraus entwickelten Vorschläge geschaffen werden, beispielsweise in Fragen der Förderpolitik, d. h. bei der Ausrichtung bzw. Priorisierung von Forschungs(förderungs)programmen, oder auch bei der Regulierungsausgestaltung.

Der hohe Aufwand, der für anspruchsvolle Beteiligungsprojekte nötig ist, und die zwiespältigen Erfahrungen mit bisherigen Aktivitäten stehen einer Ausweitung der Angebote zur direkten Beteiligung allerdings entgegen. Stattdessen bietet es sich an, das Interesse der Bevölkerung für die Synbio allgemein und für die gesellschaftliche Einflussnahme auf ihre Entwicklung auf indirektem Weg zu steigern. Hierzu könnte der Wissenschaftsjournalismus gefördert und in seinem Bestreben nach einer qualitativ hochwertigen und professionellen Berichterstattung über Entwicklungen der Synbio unterstützt werden. Zudem könnte die Auseinandersetzung weiterer Akteure – über den Kreis der in öffentlichen und privatwirtschaftlichen wissenschaftlichen Einrichtungen Forschenden hinaus –

mit der Synbio gefördert werden, die durch die Aktivitäten der DIY-Biologen und Biokünstler bereits begonnen hat. Dafür könnten schließlich auch zivilgesellschaftliche Organisationen durch geeignete Fördermaßnahmen in ihrer öffentlichkeitswirksamen Diskussion der Synbio unterstützt werden, um auf diese Weise neue Räume der Debatte über die gesellschaftlich wünschenswerte Ausrichtung der Synbio, aber auch der Biotechnologie allgemein zu öffnen. Solange der öffentliche Diskurs noch kein breiteres Ausmaß erlangt hat, spielen nicht zuletzt auch die Stärkung und die Kontrolle bestehender demokratischer Institutionen der Governance der Synbio im nationalen, europäischen wie internationalen Rahmen eine wichtige Rolle. Dies umfasst die Stärkung internationaler Abkommen wie der »Convention on Biological Diversity« (CBD) bzw. der »Biological and Toxin Weapons Convention« (BTWC) ebenso wie die Bearbeitung von Problemen bei der Besetzung von Gremien wie beispielsweise der EFSA (König et al. 2014, S. 317 f.).

Alle diese Aktivitäten haben einen explorativen Charakter, solange nicht mehr und gesichertere Erfahrungen mit ihnen vorliegen. Dies spricht nicht gegen ihre Durchführung, allerdings sollten sie wissenschaftlich begleitet werden, um die Erfahrungen mit ihnen auf systematische, transparente Weise zu erfassen und wissenschaftlich auszuwerten. Insofern bleibt auch die Begleitforschung zur Synbio wichtig, deren Aufgabe sich allerdings wandelt von einer abstrakten Betrachtung der Chancen, Risiken und ethischen Fragen der Synbio zu einer wissenschaftlichen Begleitung und Evaluation der Diskursaktivitäten. Eine zweite wichtige Aufgabe der Begleitforschung liegt in der engen Zusammenarbeit mit Forschenden der Synbio, wie sie in einigen Projekten bereits institutionalisiert wurde. Dabei geht es nicht allein um das (disziplinäre) Einbringen gesellschaftlicher Perspektiven in den Forschungsprozess, sondern darüber hinaus um eine (interdisziplinäre) Kooperation und die Reflexion grundlegender Annahmen der Synbio-Forschung, die zu neuen, innovativen Forschungsansätzen führen kann (Calvert/Martin 2009). Auch zu dieser Form der interdisziplinären Zusammenarbeit liegen noch zu wenige Erfahrungen vor, sodass hier weitere systematische Erprobungen nötig erscheinen.

# DIY-BIO(TECHNO)LOGIE – AKTEURE UND PERSPEKTIVEN VI.

Seit einigen Jahren wird eine zunehmend selbstbewusste, sich formierende Bewegung von biologischen Freizeitforschern wahrgenommen und regelmäßig in Verbindung mit dem Thema Synbio gebracht.

Wie im Folgenden gezeigt wird, betreiben die DIY-Biologen sicherlich noch keine Synbio i. e. S. und technisch und apparativ hängt das Niveau in den allermeisten Fällen um Jahre hinter aktuellen professionellen Standards hinterher. Es gibt aber mindestens drei wichtige Gründe dafür, das Phänomen im Kontext dieses Berichts dennoch näher zu beleuchten:

> Zum Ersten könnte der technologische Rückstand spätestens dann schrumpfen bzw. in bestimmter Hinsicht geradezu verschwinden, wenn ein zentrales Ziel – bzw. die Vision – der Synbio i. e. S. Realität wird, nämlich die digitale Modellierung und automatisierte Produktion synthetischer Organismen.
> Zum Zweiten liefert die DIY-Biologie bereits jetzt Impulse für die Debatte über die Perspektiven der Synbio (i. w. S.), ihre gesellschaftliche Nützlichkeit und Erwünschtheit sowie insbesondere den Anspruch der Öffentlichkeit auf eine echte Teilhabe am Forschungs- und Innovationsprozess.
> Und zum Dritten werden regelmäßig Sorgen hinsichtlich möglicher Biosafety- und Biosecuritygefahren der DIY-Aktivitäten thematisiert und vor allem in den USA von den Sicherheitsbehörden durch eine direkte Einflussnahme auf die DIY-Bioszene aufgegriffen (Kap. VI.4.4).

Die zukünftige Bedeutung dieser Aspekte ist naturgemäß nicht exakt abschätzbar, aber ein Abtun (»das bleibt auf absehbare Zeit so«/»das wird nie etwas«) erscheint kaum noch angemessen in einer Zeit, in der sich Kommunikations- und Verhaltensweisen global und durch alle Gesellschaftsschichten mit beispielloser Geschwindigkeit verändern (Sauter 2013, S. 20). Einen Ausgangspunkt für die folgende Darstellung bildete das Gutachten von Engelhard/Hagen (2012), die im Rahmen von Interviews mit Akteuren aus öffentlichen und privaten Forschungseinrichtungen u. a. der Frage nachgegangen sind, ob und welche Einflüsse diese von der DIY-Biologiebewegung erwarten. Eine erste Vertiefung erfolgte dann im Rahmen einer Kurzexpertise von Rüdiger Trojok (2012) sowie eines Kommentargutachtens dazu von Christof Potthof (2013) vom Gen-ethischen Netzwerk e. V. Die endgültige Ausarbeitung erfolgte durch Rüdiger Trojok im Rahmen einer weiteren Kurzexpertise (Trojok 2014) sowie als ITAS-Mitarbeiter im Zuge der Endberichtserstellung.

## Verortung der DIY-Bio 1.

Mit dem Begriff Do-it-yourself-Biologie (DIY-Bio), wird eine sehr heterogene Szene von Freizeitforschung bezeichnet, die im häuslichen Umfeld, an angemieteten Laborplätzen oder in Vereinen mit kleinen privaten Laboren stattfindet (Engelhard/Hagen 2012, S. 31). Durch die konzeptionelle Nähe der Akteure zur traditionellen Computerhackerszene werden die Mitglieder der Szene insbesondere im deutschsprachigen Raum häufig als »Biohacker« betitelt. Garagenbiologie, Outlawbiologie, Biohacking, Biopunk oder DIY-Genomics sind synonym oder zumindest in großen Teilen als überlappend zur DIY-Biologie zu verstehen, teilweise werden sie aber auch als Unterbereiche oder

als parallele Bewegungen bezeichnet. Ihnen allen gemeinsam ist, dass es sich um biologische, meist biotechnologische, teils genetische Forschung außerhalb der akademischen institutionalisierten Forschung handelt (Engelhard/Hagen 2012, S. 31). Eine begriffliche Unklarheit besteht im Hinblick auf die Cyborgs und Transhumanisten, die gelegentlich auch als Biohacker bezeichnet werden, hier aber nicht weiter thematisiert werden sollen (Heil/Coenen 2013).

Die Akteure in der DIY-Biologie lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: Einerseits diejenigen, die akademische Wurzeln in der biologischen bzw. biotechnologischen Forschung haben, und andererseits solche, die in der Biologie Laien sind (Engelhard/Hagen 2012, S. 31). Letztere rekrutieren sich aus verschiedenen Natur- und Computerwissenschaften, der Elektrotechnik, stammen aus Ingenieurberufen oder sind ansonsten Künstler, Designer oder Unternehmer. In der ersten Gruppe finden sich auch einige ehemalige iGEM-Teilnehmer, die in der DIY-Biologie die Möglichkeit sehen, neben der institutionalisierten Forschung in einer freieren und kreativeren Weise zu arbeiten. Oder es handelt sich um Forschende, die neben ihrer akademischen Karriere außergewöhnliche oder sehr persönliche Forschungsprojekte realisieren wollen, die sie in der institutionalisierten Forschung nicht verwirklichen können (Engelhard/Hagen 2012, S. 32). Um die DIY-Biologie herum hat sich in den letzten Jahren außerdem eine Gruppe von Beobachtern gebildet, darunter Journalisten, Sozialwissenschaftler, Philosophen, Politiker und nicht zuletzt Mitarbeiter von Sicherheitsbehörden (Kap. VI.4.4).

Eine exakte Bestimmung der Größe der Biohackerszene ist nicht möglich, da es hierzu keine belastbaren Daten gibt und in vielen Fällen die Zuordnung der Akteure zu Start-ups, der Academia, dem Kunstbetrieb oder originärem Amateurengagement unklar ist. Es werden global einige (wenige) Tausend aktive Biohacker vermutet. Um diese heterogene Szene am besten zu erfassen, wird im Folgenden ein chronologischer Ablauf ihrer Entwicklung beschrieben. Diese lässt sich in vier zeitlich grob abgrenzbare Phasen unterteilen, die sich allerdings lokal/regional in unterschiedlichen Geschwindigkeiten vollziehen und daher fließend ineinander übergehen:

> Phase I: Pioniere in der Kunst
> Phase II: Globale Vernetzung
> Phase III: DIY-Biogründerzeit
> Phase IV: Weitere Entwicklung der Szene – zwischen Kommerzialisierung und Open Source

Für die vier Phasen werden die jeweils erstmals auftretenden Akteure, ihre Hintergründe und ihr Einfluss auf die DIY-Bioszene sowie die Gesellschaft insgesamt beleuchtet. Dabei sollte beachtet werden, dass die in der jeweiligen Phase neu auftretenden Akteure in der Regel in den späteren Phasen der Entwicklung ständige Stakeholder in der Szene bleiben und diese weiterhin beeinflussen.

Die erste Phase (»Pioniere in der Kunst«; Kap. VI.2) reicht bis in die frühen 1990er Jahre zurück, als eine kleine Avantgardekunstszene begann, sich mit biologischen Themen und Materialien zu befassen, und so die intellektuelle Grundlage für die weitere Entwicklung legte. Darauf folgte Anfang der 2000er Jahre eine Phase der »globalen Vernetzung« (Kap. VI.3), während derer sich die Szene, hauptsächlich aus Wissenschaftlern und Studenten bestehend, die dem Ideal unabhängig zu forschen nachgingen, allmählich im Internet organisierte. Diese Entwicklung erreichte ihren vorläufigen Höhepunkt im Jahr 2008 mit der Gründung der digitalen Netzwerke »DIYbio.org« (mit der gleichnamigen Google-Mailingliste) und »Hackteria.org« (mit Mailingliste und zugehörigem Dokumentations-Wiki). In diesen Netzwerken begann sich die Szene global auszutauschen, wurde dadurch sichtbar und katalysierte somit öffentliches und institutionelles Interesse. Die dritte Phase

(»Gründerzeit«; Kap. VI.4) zeichnet sich durch das Erreichen einer kritischen Masse von lokalen Akteuren aus und führte seit 2010 vermehrt zur Gründung von sogenannten Biohacker- oder Makerspaces als Orte der nichtdigitalen Begegnung der Gemeinde. Dabei wurden und werden an unterschiedlichen Orten der Welt Labore und Gemeinschaftsräume zur kollaborativen Umsetzung verschiedenster Projekte eingerichtet. In diesem Zusammenhang werden unter anderem Fragen zur Biosicherheit diskutiert. Dieser Prozess setzt sich seither kontinuierlich fort. Ein neues Merkmal der derzeitigen vierten Phase ist die zunehmende »Entwicklung der Szene – zwischen Kommerzialisierung und Open Source« (Kap. VI.5), die durch Start-up-Gründungen und professionell umgesetzte Veranstaltungen wie Messen oder Festivals gekennzeichnet ist. Mit diesen Kommerzialisierungstendenzen stellt sich für die auf offenen Austausch begründete Szene nun konkret die Frage nach geistigem Eigentum und den zugrundeliegenden Rechtskonzepten. In diesem Kapitel wird daher ein Vergleich zur Open-Source-Bewegung der IT-Welt gezogen. Abschließend wird in Kapitel VI.6 ein Zukunftsszenario vorgestellt, das in der europäischen Biohackerszene entworfen wurde. Das Konzept der »Bio-Commons« greift die in den vorhergehenden Kapiteln aufgeworfenen Fragen kulturelle Integration der Biotechnologie, Freiheit der Forschung, Sicherheitsbedürfnisse sowie gemeinwohlorientierte wirtschaftliche Nutzung neuer Erfindungen auf und entwickelt hierfür einen produktiven Lösungsansatz.

## Phase I: Pioniere in der Kunst 2.

### Bioart 2.1

Bioart ist der künstlerische Umgang mit biologischer Materie wie Geweben, Bakterien oder Lebendem im Allgemeinen und/oder die kritische Auseinandersetzung mit Biotechnologie (u. a. Genmanipulation, Zellkultur und Klonieren). Solche Kunst wird in Laboren, Studios und Galerien produziert. Es herrschen unterschiedliche Auffassungen darüber vor, ob Bioart ausschließlich auf Lebewesen bezogene Werke einschließt oder ob auch die tangierenden Themengebiete wie Medizin und biologische Forschung in diesen Kontext gehören (Pentecost 2008).

Daher kann Bioart thematisch der »Science Art« oder auch »Art Science« zugeordnet werden. Erstes beschreibt wissenschaftlich relevante Materialien oder Methoden, die künstlerisch aufbereitet werden, ohne diese inhaltlich zu sehr abzuwandeln. Letzteres ist Kunst, die mithilfe wissenschaftlicher Methoden produziert wird oder diese behandelt, ohne Anspruch auf Wissenschaftlichkeit zu erheben. Science Fiction gehört in die Kategorie der »Art Science«. Die Komplexität des Themas Synthetische Biologie und die vielseitigen theoretischen Möglichkeiten sprechen Akteure unterschiedlicher Hintergründe an. Insbesondere das bisher noch undefinierte Potenzial der Synthetischen Biologie lässt viel Raum für künstlerische Interpretation und Utopien. Mit Beginn der 1990er Jahre formierte sich eine kleine, internationale Avantgarde-Kunstszene, die sich mit biologischen Materialien und Kontexten befasste. Dabei wurden und werden einerseits ökologische Fragen und Probleme thematisiert, Praktiken aus der modernen Biotechnologie für die Schaffung von Kunstwerken oder Performances adaptiert und auch kritische Fragen über die Rolle von Wissenschaft in der Gesellschaft gestellt.

Das 1987 in den USA gegründete Critical Art Ensemble (CAE) beispielsweise hat eine lange Tradition der Beschäftigung mit Biotechnologien und politischem Aktivismus (Potthof 2013, S. 16).

Das Künstlerkollektiv hat u. a. explizit auf die Möglichkeiten hingewiesen, biotechnologische Interventionen als Protest gegen gentechnisch veränderte Pflanzen der Monsanto Company zu (Critical Art Ensemble 2006): »Das CAE führt vor, was eine Amateurwissenschaft schaffen kann: Mit relativ geringem Aufwand lässt sich ein Mittel herstellen, das, wenn es versprüht wird, die Roundup Ready Gentech-Pflanzen von Monsanto einfärbt, und zwar nur diese und keine anderen Organismen, die auf dem Feld vorkommen.«

Einen demgegenüber »konträren« Ansatz, transgene Lebewesen als »Kunstobjekte« zu schaffen, verfolgte der Künstler Eduardo Kac. Im Jahr 2000 stellte er ein transgenes Kaninchen her, in dessen Genom ein aus der Tiefseequalle Aequorea victoria stammendes Gen zur Herstellung eines grünfluoreszierenden Proteins (GFP) integriert war (Abb. VI.1). Kac erklärte, das Kaninchen als neues Mitglied in seine Familie aufnehmen zu wollen, mit dem Ziel, eine kontroverse Debatte in der Öffentlichkeit zu stimulieren, um dadurch die sozialen und ethischen Implikationen der Gentechnologie aufzuzeigen.[138]

ABB. VI.1 EDUARDO KAC IM JAHR 2000 MIT SEINEM GFP-KANINCHEN NAMENS ALBA BEI SICH ZUHAUSE



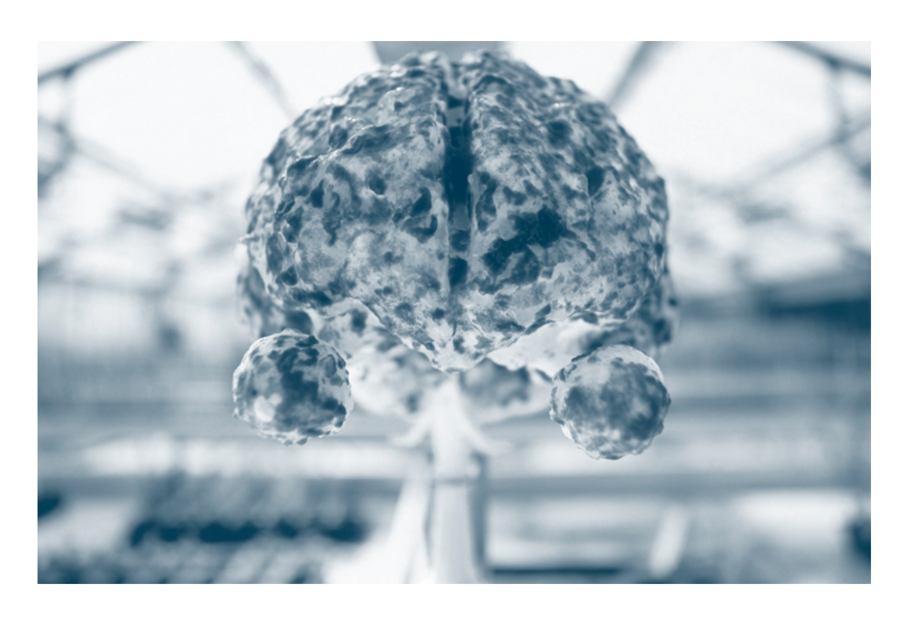
Quelle: Chrystelle Fontaine; www.ekac.org/gfpbunny.html#gfpbunnyanchor (30.11.2015)

Ein weiteres Beispiel für die Verwendung transgener Lebewesen als Material eines Kunstobjekts ist das leuchtende Gehirn des Künstlers Jun Takita. Ein dreidimensionaler Scan seines Gehirns wurde in Übergröße als Plastik gedruckt und mit einem transgenen Moos bepflanzt, das Gene eines selbstleuchtenden Einzellers integriert hatte (Abb. VI.2). Das so biologisch leuchtende Gehirn

138 www.ekac.org/gfpbunny.html (30.11.2015)

wurde daraufhin u. a. in einem Leuchtturm an der französischen Küste anstelle der Glühbirne installiert. Mit der Arbeit sollte der Mensch als Schöpfer, der in den Zyklus des Lebens eingreift, thematisiert werden.

ABB. VI.2 LEUCHTENDES GEHIRN AUS TRANSGENEM MOOS (»LIGHT, ONLY LIGHT«, ERSTE VERSION)



Quelle: Yusuke Komiyama; http://juntakita-artworks.blogspot.de/2012/03/light-only-light-light-only-light.html (30.11.2015)

Einen vorrangig humoristisch-reflektierenden Ansatz verfolgte dagegen der Künstlers Paul Vanouse. Als Überspitzung des minimalistischen Biohackingkonzepts führte er die Polymerasekettenreaktion, ganz konträr zur üblichen industriellen, hoch automatisierten Anwendungsweise, manuell und fernab der Zivilisation im kanadischen Wald, nur mithilfe von durch ein Lagerfeuer temperierten Wassereimern durch.[139]

Unter den Galerien, Künstlernetzwerken und Museen, die Bioart einer breiten Öffentlichkeit präsentieren, können das Center for PostNatural History[140] in Pittsburgh, USA,die deutsche Kunstgalerie Art Laboratory Berlin[141] und das Ars Electronica Center[142] in Linz, Österreich, hervorgehoben werden. Das Center for PostNatural History präsentiert seine Ausstellungen im Stil klassischer Naturkundemuseen, jedoch ausschließlich mit konservierten Organismen, die vom Menschen geschaffen wurden – durch traditionelle Züchtung, aber auch transgene Lebewesen. Das Art Laboratory Berlin, 2006 von einem internationalen Team von Kunsthistorikern und Künstlern gegründet, versteht sich als eine Plattform für interdisziplinäre Ausstellungsprojekte zum Beispiel zu Kunst und Naturwissenschaften im internationalen Kontext. Das Ars Electronica Center wurde 2009 eingerichtet und zeigt regelmäßig Ausstellungen zum Thema Gentechnologie, Synthetische Biologie und Life Science generell. Es bietet Besuchern und Künstlern vor Ort die Nutzung eines Biologielabors

139 www.paulvanouse.com/dwpcr.html (30.11.2015)
140 www.postnatural.org (30.11.2015)
141 www.artlaboratory-berlin.org (30.11.2015)
142 www.aec.at/news/ (30.11.2015)

und veranstaltet ein jährliches Kunstfestival. Mit dem BIO·FICTION Science Art Film Festival[143], das 2011 und 2014 in Wien veranstaltet wurde, hat Bioart nun auch ein eigenes Format an der Schnittstelle zu Citizen Science (Kasten VI.2 in Kap. VI.3.1), Synthetischer Biologie und Filmkunst.

Ein in der Kunstszene einflussreiches Netzwerk ist die Finnish Bioart Society[144], die sich mit Naturwissenschaften und insbesondere Biologie befasst. Sie betreibt seit 2008 in Kilpisjärvi eine polare Forschungsstation im äußersten Nordwesten Finnlands. Der Fokus liegt neben originär künstlerischen Arbeiten darauf, die gesellschaftliche Diskussion über Synthetische Biologie, Biotechnologie und Bioethik anzuregen. Dazu dient die Finnish Bioart Society als Knotenpunkt zwischen Naturwissenschaft und Kunst und bietet regelmäßige Seminare und Workshops in einem Biolabor in Helsinki sowie auf der Polarstation an.

Insgesamt betrachtet repräsentiert die Kunst in der Biologie eine Randerscheinung, die zudem häufig auf Möglichkeiten der Visualisierung und Kommunikation reduziert wird. Ein Teil der expliziten künstlerischen Auseinandersetzung mit Biologie entspringt zudem forschungspolitischem Interesse an der Vermittlung von Wissenschaft und Technik. Der Künstler Oron Catts kommentiert dieses Phänomen in einer E-Mail an Engelhard/Hagen (2012, S. 50) so: »... it is quite striking to see how artists and designers have been opted to engineer public acceptance for a new technology that does not really exist. I see Synthetic Aesthetics as being part of that. What is interesting with Synthetic Biology is that the funding for artists and designers has been put in place very early in the game by the proponents of SynBio as opposed to anything else I experienced in the context of art and new knowledge/technologies.«

Wenn die Initiative und Finanzierung künstlerischer Aktivitäten auf biowissenschaftlich, biotechnologisch oder ökonomisch ausgerichtete Projekte und Fördertöpfe zurückgehen, wird die Grenze zwischen freier Kunst und Information der Öffentlichkeit fließend. Zwar kann die Kunst dann weiter eine wichtige Rolle bei Vermittlung, Kritik und Erforschung möglicher gesellschaftlicher Folgen einnehmen – es kann aber auch zu einer Instrumentalisierung kommen, bei der die Kunst die Öffentlichkeit auf die biotechnologischen Entwicklungen vorbereiten soll. Was ethische Grenzen betrifft, ist nicht eindeutig, dass die Kunst in diesem Bereich prinzipiell freier als die Wissenschaft ist. Die Mittel der Kunst sind zwar besonders geeignet, ethische Fragen mit all ihrer Komplexität und auch übertreibend und provozierend zu thematisieren. Der deutsche Künstlerzusammenschluss Hybrid Video Tracks beispielsweise verstand seine Beiträge explizit als kritischen Standpunkt zur Verbreitung von Biowissenschaften bzw. -technologien.[145]

Gleichzeitig bleiben Künstler, die mit biotechnologischen Methoden arbeiten, nicht von Kritik verschont, sondern rufen diese besonders stark hervor – und bezwecken dies häufig auch. Ein Beispiel ist das fluoreszierende Kaninchen von Eduardo Kac: Während die Züchtung transgener Labortiere mit Quallengenen biotechnologische Routine ist, die in Forschungslaboren weitgehend unbeachtet durchgeführt wird, war die Übertragung dieser Technologie in ein Kunstprojekt hochkontrovers und erzeugte enorme mediale Aufmerksamkeit (Costa/Philip 2008; Lindner 2007).

---

143 http://bio-fiction.com (30.11.2015)

144 http://bioartsociety.fi (30.11.2015)

145 Siehe dazu www.hybridvideotracks.org und www.blue-genes.de/index.html mit Texten von Hybrid Video Tracks, Critical Art Ensemble, Tissue Culture & Art Project/SymioticA, Thomas Lemke, Agentur (Kobe Matthys), Andrea zur Nieden, Paul Vanouse und anderen. Die Beiträge des Katalogs sind auf den Seiten der Ausstellung »Put onyour Blue Genes« online dokumentiert (30.11.2015).

## Kunst und DIY-Bio 2.2

Durch den hohen Aufwand, den die Bio- bzw. Gentechnologie bisher erforderte, kooperieren Künstler in der Regel mit wissenschaftlichen Einrichtungen und greifen die bereits zu wissenschaftlichen Zwecken etablierten Materialien, Lebewesen und Methoden für ihre Arbeit auf. Im Kontext der Tendenzen, Kunst als Wissenschaftskommunikation zu vereinnahmen, kann es für Künstler schwierig sein, eine kritische Distanz zu den von ihnen bearbeiteten Themen zu wahren. Zudem erwarten große Institute, wie das Ars Electronica Center, vornehmlich Werke mit starker Signalwirkung in der Öffentlichkeit. Diese können zwar auch wissenschaftskritisch sein, lassen jedoch wenig Raum für die subtile Kritik der »Fine Arts«, wie sie zum Beispiel in kleinen Galerien wie dem Art Laboratory Berlin gezeigt wird, die komplexere Gedanken und Themen angehen und vom Betrachter mehr Zeit und Muße verlangen. Um kommerziellem Druck seitens der Geldgeber sowie dem kunstbetriebsinternen Erfolgsdruck aus dem Weg zu gehen und trotz finanzieller Limitierung eigenständig und unabhängig mit den Methoden der Gen- und Biotechnologie zu arbeiten, versuchten einige Künstler bereits in frühen Arbeiten in den 1990er Jahren eigene, günstigere Methoden zu etablieren, ganz im Sinn der DIY-Biobewegung. Künstler waren dadurch von Beginn an prägender Bestandteil derselben. Im Lauf der letzten Jahre vermischten und überlagerten sich daher die Projekte, Ideen sowie Ziele der beiden Szenen auf vielfältige Weise. Künstler profitieren dabei vom technologischen Wissen und der neuen günstigen Methoden und Materialien, die Biohacker entwickeln. Künstler wiederum inspirieren »nichtkünstlerische« Biohacker mit Projektideen, aber auch mit gesellschaftskritischen Perspektiven. Die Interaktionen sind dabei so unterschiedlich wie die einzelnen Akteure.

Während manche Biohacker mit wissenschaftlicher Ausbildung beispielsweise damit beginnen, Kunst zu produzieren und auszustellen, fangen Künstler an, wissenschaftliche Apparaturen zu konstruieren. Manche der entstandenen Werke, wie die des Critical Art Ensembles, nehmen eine gesellschafts- und technologiekritische Position ein, andere, wie die Eduardo Kacs, erscheinen affirmativ. Potthof (2013, S. 17) interpretierte die Verbindung der DIY-Bio- und Kunstszene als einen Ansatz, eine emotionale Ablehnung transgener Biotechnologie in der Öffentlichkeit zu überwinden. So soll durch Aufklärung und Vermittlung über Gentechnologie stattdessen eine informierte Opposition ermöglicht werden. Die künstlerische Interpretation des Themas diene demnach als Vehikel, um sich über Biotechnologie zu verständigen, und als Möglichkeit, Visionen, Hoffnungen und Ängste produktiv zu verarbeiten (Critical Art Ensemble 2006).

Kennzeichnend für Projekte, die aus dieser Verbindung hervorgehen, ist die Schwierigkeit der Zuordnung zu Wissenschaft einerseits und Kunst andererseits. Zum Teil ist dies gewollt, um sich etwa einer Politisierung der eigenen Arbeit zu entziehen, zum Teil unbeabsichtigte Folge der nichtinstitutionellen Arbeitsweise. Ob Künstler und Biohacker dabei Anspruch auf eine Wissenschaftlichkeit der eigenen Arbeit erheben oder nicht, hängt von den beteiligten Personen und der Art des Projekts ab. Eine Folge der Durchdringung der Szenen ist zum Beispiel die Idee der »Bio-Commons« (Kap. VI.6), die im Rahmen des finnischen »Pixelache Festivals« entwickelt wurde. Das Festival wird jährlich veranstaltet und behandelt Themen an der Schnittstelle von Kunst, Wissenschaft und Medien und wurde 2014 von der Finnish Bioart Society mitveranstaltet. Seit Neuestem tendieren auch institutionalisierte Forschung und Kunst dazu, sich den Aktivitäten der Künstler und Biohacker zu öffnen. Dies äußert sich durch eine zunehmende Präsenz der beiden Szenen auf Veranstaltungen wie dem BIO·FICTION Science Art Film Festival und der Präsentation der Arbeiten der DIY-Bioszene durch Galerien wie das Ars Electronica Center.

## Phase II: Globale Vernetzung 3.

### Die DIY-Bioszene 3.1

Eines der Kernanliegen der Biohacker ist es, Wissen und Methoden der Lebenswissenschaften einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen (Kasten VI.1). Um dies zu ermöglichen, begannen weltweit zu Beginn der 2000er Jahre einige zumeist junge Wissenschaftler und Ingenieure, sich in digitalen Foren zu vernetzen, Versuchsanleitungen und -protokolle auszutauschen und Projekte zu diskutieren. Zu Anfang waren es vorwiegend lokale Gruppen oder Netzwerke, die sich in Freundes- und Kollegenkreisen um Akteure der ersten Stunde herum entwickelten. Mittlerweile ist daraus eine globale, stark dezentrale Citizen-Science-Gemeinschaft entstanden (Kasten VI.2).

**KASTEN VI.1: HACKEN UND JUGAAD**

Hacken bedeutet, Gegenstände oder auch Ideen aus ihrem ursprünglichen Kontext herauszulösen und ihnen eine neue Funktion zu geben. Der Begriff Hacken kann auch ganz allgemein als Basteln, Tüfteln, Frickeln (»tinkering«) verstanden werden, also als das Ausprobieren technischer Möglichkeiten aus Spaß am Spielen mit Technologie und Materialien. Im Rahmen der Computersicherheit wird der Begriff oft dahingehend verwendet, dass die sogenannten Hacker »sich mit Sicherheitsmechanismen und deren Schwachstellen [beschäftigen]. Während der Begriff auch diejenigen beinhaltet, die Sicherheitslücken suchen, um sie aufzuzeigen oder zu korrigieren, wird er von den Massenmedien und in der allgemeinen Öffentlichkeit häufiger für Personen benutzt, die unerlaubt in fremden Systemen solche Lücken ausnutzen. Entsprechend ist der Begriff stark positiv beziehungsweise negativ belegt«.[146]

Im Kontext der DIY-Bioszene ist das Hackingkonzept ein zentrales, wiederkehrendes Motiv. Der aus dem indischen Urdu importierte Begriff »Jugaad« ist dem des Hackens verwandt und beschreibt eine innovative Lösung eines Problems, häufig in Form eines einfachen Workarounds. In beiden Fällen werden bestehende Regeln oder Beschränkungen übergangen, um auf einfachstmögliche Weise mit komplizierten Sachverhalten umgehen zu können. Im Unterschied zum Hacken, das in der westlichen Welt zunehmend eine intellektuelle, künstlerische oder ästhetische Ausdrucksform darstellt, entsteht der Jugaad aus materieller Not und dient als Überlebenstaktik. Jugaad wird insbesondere in Indien als Managementstrategie für »frugale Innovation« betrachtet. Frugale Innovation ermöglicht die Verwertung marginaler Ressourcen mit minimalem Gewinn durch Reduktion von Produktkomplexität auf ein funktionales Minimum (Crabtree 2012). Hacken und Jugaadpraktiken beruhen auf dem Bedürfnis zu tun, was nötig erscheint und machbar ist, ungeachtet bestehender Konventionen oder vorgeblicher Sachzwänge.

Für den digitalen Informationsaustausch sind die sehr weit verbreiteten Wikis, aber auch die Kommunikation via Twitter, Skype, Dropbox, Mendeley und andere Onlinedienste von grundlegender Bedeutung. Durch die Onlinepräsenz kamen kontinuierlich weitere Teilnehmer hinzu, und es entwickelte sich ein stetig zunehmender Informationsaustausch, der im Wesentlichen auf Tipps und

146 http://de.wikipedia.org/wiki/Hacker_%28Computersicherheit%29 (30.11.2015)

Tricks zur Entwicklung und Nutzung von Labormaterialien und -geräten zur Einrichtung eines eigenen Labors mit möglichst geringem finanziellem Aufwand ausgerichtet war.

**KASTEN VI.2: CITIZEN SCIENCE: »TOP DOWN« UND »BOTTOM UP«**

Unter dem seit einigen Jahren verbreiteten Begriff Citizen Science (Finke 2014; Ziegler et al. 2015) werden vorrangig Forschungsprojekte verstanden, die von Wissenschaftlern konzipiert worden sind und bei denen Bürger als mehr oder weniger Fachkundige an der Datenerhebung aktiv beteiligt sind (Hennen/Pfersdorf 2014, S. 49 ff.). Es handelt sich sozusagen um eine »Wissenschaft *mit* Bürgern«, deren Vorteil in der großen Zahl der Beteiligten liegt, die innerhalb des organisierten Wissenschaftssystems nicht erzielt werden könnte. Typische traditionelle Beispiele sind Vogel-, Schmetterlings- und andere Tierartenzählprojekte, seit der Verbreitung von Personalcomputern auch das Zur-Verfügung-Stellen von Rechnerkapazität für astronomische Beobachtungen. Neuere Projekte nutzen mobile Endgeräte oder auch Computergamevarianten.[147]

Die DIY-Biologie steht stellvertretend für einen anderen Typus von Citizen Science, mehr im Sinn einer »Wissenschaft *durch* Bürger«, womit sie an die Ursprünge der modernen Wissenschaft Ende des 17. Jahrhunderts anknüpft, als zunächst vor allem Aristokraten, später dann zunehmend Bürger aus intellektuellem Interesse Forschung im Privaten betrieben. Der Typus des professionellen, öffentlich oder privat angestellten Wissenschaftlers entstand erst Ende des 19. Jahrhunderts. DIY-Wissenschaft in Hacker- oder Makerspaces bzw. »fabrication laboratory« (FabLabs) (Kap. VI.4.1) beruft sich auf die grundgesetzliche verbriefte Forschungsfreiheit (Art. 5 Abs. 3 Grundgesetz). Forschung und Wissenschaft sollen nicht nur von einer elitären akademischen Elite betrieben werden, sondern allen Bürgern soll Zugang zu wissenschaftlichen Quellen, Techniken und Materialien ermöglicht werden. Theoretisch soll sich jeder als Forscher betätigen können, unabhängig von Vorbildung oder Zugehörigkeit zu einem etablierten Forschungsinstitut oder kommerziellen Labor.

Eine weitere, noch expliziter auf die Politik gerichtete Konnotation bekommt Citizen Science durch den von manchen Akteuren formulierten Anspruch auf stärkere gesellschaftliche Mitbestimmung bei der öffentlichen Forschungsförderung. Hierbei spielen Vertreter der organisierten Zivilgesellschaft eine besondere Rolle (Ober 2014; Veciana/Neubauer 2014). Unterschiedliche Formen der Partizipation werden mittlerweile von der Forschungspolitik gefördert. Die aktive Unterstützung der DIY-Biologie gehört bislang noch nicht dazu.

Insofern nicht explizit erwähnt, werden im weiteren Text alle drei Ausprägungen unter dem Oberbegriff Citizen Science behandelt.

Die anfänglichen Teilnehmer der Mailinglisten waren vor allem Studenten der Lebenswissenschaften, Amateur- oder fachfremde Wissenschaftler, darunter Ingenieure, sowie ehemalige Biologen, die den Beruf gewechselt hatten. Vertreter der ersten Stunde sind beispielsweise Jason Bobe und Mackenzie Cowell als Begründer der Website »DIYbio.org« sowie der DIY-Bio-Google-Mailingliste. Bobe ist zudem beteiligt am »Personal Genome Project«[148], das vom Genetiker George Church, einem prominenten Vertreter der Synthetischen Biologie, an der Harvard Medical School

147 www.buergerschaffenwissen.de (30.11.2015)
148 www.personalgenomes.org (30.11.2015)

(HMS) der Harvard University initiiert wurde. Die Website »DIYbio.org« gilt als die erfolgreichste Mailingliste in der DIY-Bioszene und dient seit der Gründung 2008 als Anlaufstelle, um die DIY-Bioszene zu bewerben und zu vernetzen. Jedoch liegt der geografische Schwerpunkt der Diskutanten im Wesentlichen in den USA. Das erste und nach wie vor aktivste Netzwerk im europäischen Raum, ebenfalls 2008 von Yashas Shetti, Marc Dusseiller und Andy Gracie gegründet, ist »Hackteria.org«. Die Organisation war 2012 für den Zedler-Preis für Freies Wissen nominiert,[149] der jährlich von der Wikimedia Deutschland – Gesellschaft zur Förderung Freien Wissens e. V. vergeben wird. »Hackteria.org« besteht aus einem Wiki[150] und einer Website, welche die Projekte der Betreiber und deren Netzwerk sammelt und präsentiert. Das Netzwerk hat neben einem Fokus auf der Schweiz und Mitteleuropa eine starke Anknüpfung nach Asien, insbesondere Indonesien und Indien. Neben diesen internationalen Netzwerken gibt es eine Vielzahl von lokalen Initiativen, hauptsächlich im Bereich größerer Ballungszentren und Städten. Obwohl der erste Hype bereits kurz nach der Gründung von »Hackteria.org« und »DIYbio.org« ab 2009 nachlies, breitet sich die Szene noch immer global kontinuierlich aus und umfasst mittlerweile alle Kontinente mit Ausnahme Australiens.

Seit ca. 2010 beginnt die weiterhin global vernetzte Szene, sich in regionale Untergruppierungen aufzuteilen. Im europäischen und nordamerikanischen Raum ist sie zum Beispiel auch durch physische Zusammenkünfte länderübergreifend zusammengewachsen und trifft sich mittlerweile mehrmals pro Jahr in verschiedenen Städten der Kontinente zu Workshops und Veranstaltungen. Darüber hinaus, wenn auch weniger häufig, finden interkontinentale Treffen statt. Je nach Land und Mentalität bzw. Grundausrichtung gegenüber den Lebenswissenschaften bilden sich unterschiedliche Schwerpunkte.

Neben stark ausgeprägtem apolitischem Unternehmertum, das in der Tradition des Silicon Valleys steht, gibt es basisdemokratische, nihilistische, idealistische, antiautoritäre und kapitalismuskritische Tendenzen, die in unterschiedlichen Ausprägungen und Kombinationen auftreten. Trotz einer deutlichen Mehrheit von Männern in der Szene sind einige Frauen mit starkem meritokratischem Einfluss anzutreffen, auch feministische Positionen werden vertreten. Ein Teil der Biohacker steht einer Politisierung oder Überhöhung ihrer Aktivitäten als neue Form einer demokratischen Bürgerwissenschaft eher abgeneigt bis gleichgültig gegenüber und hat kein primäres Interesse an gesellschaftlichen Auseinandersetzungen. Jedoch lassen sich aufgrund der neuen technologischen Möglichkeiten, welche die Synthetische Biologie verspricht, insbesondere Fragen zu Ethik und geistigem Eigentum mit traditionellen politischen Positionierungen oft nicht ausreichen erfassen bzw. beantworten. Die zunehmende technologische Emanzipation macht eine kritische Auseinandersetzung in der Szene unvermeidbar und erzeugt neue potenzielle politische und ethische Bruchlinien zwischen den Diskussionsteilnehmern. Am Beispiel der Entwicklung des »Code of Ethics« wurde erkennbar, dass im nordamerikanischen Raum utilitaristische Tendenzen deutlich mehr Raum einnehmen als in Europa. Durch eine zunehmende Integration der Biokünstler (Kap. VI.2), aber auch von Grenzgängern aus Philosophie und Sozialwissenschaften, haben diese mittlerweile in der europäischen und asiatischen Szene eine zentrale und richtungsweisende Position und fördern insbesondere eine stärkere Selbstreflexion der Biohackerbewegung. Dies spiegelt sich durch einen verstärkten Fokus auf soziale und ethische Fragen in der europäischen DIY-Bioszene wider. Trotz der vielfachen Differenzen gibt es aber eine gemeinsame Basis der globalen Szene. Diese besteht in einer

149 www.wikimedia.de/wiki/Pressemitteilungen/PM_6_12_Zedler (30.11.2015)
150 http://hackteria.org/wiki/ (30.11.2015)

Faszination für Technologie und einer starken Internetaffinität gepaart mit einer technoprogressiven Grundhaltung sowie dem Interesse an Open-Source- und Open-Access-Ideen (Kap. VI.6).

**CODES OF ETHICS**

Gerade weil die DIY-Bioszene außerhalb etablierter Institutionen agiert, gab und gibt es eine intensive Auseinandersetzung über die Frage nach dem Selbstverständnis und möglichen Selbstverpflichtungen. Im institutionalisierten (biologischen) Wissenschaftsbetrieb gibt es wenig Anreize für eine individuelle Reflexion des eigenen Tuns oder die Formulierung ethischer Standards. Dies kann man darauf zurückführen, dass in vielen Laboren Wissenschaftler weitgehend isoliert von der »realen« Welt arbeiten, zumeist an sehr kleinteiligen Fragestellungen, deren Verbindung zu den dahinterstehenden, möglicherweise durchaus problemlösungsorientierten Gesamtprojekten für die Einzelnen kaum noch erkennbar, zumindest für die konkrete Arbeit nicht leitend ist. Hinzu kommen bei biologischen Arbeiten meist strenge Vorschriften sowie spezielle Sicherheitsbeauftragte, die deren Einhaltung überwachen. Hierdurch wird dem Einzelnen die Eigenverantwortung weitgehend abgenommen, und es gibt kaum noch eine Notwendigkeit, sich selbstständig mit weiter reichenden Konsequenzen der eigenen Arbeit auseinanderzusetzen. Zwar haben mittlerweile große Forschungsorganisationen Ethikkodizes formuliert, die sich neben der institutionellen Verpflichtung auf das Bewusstsein und die Verantwortung der einzelnen Mitarbeiter beziehen, aber dadurch ist noch lange nicht gewährleistet, dass die in den Kodizes formulierte Haltung auch tatsächlich verinnerlicht wird (Kap. IV.2.2). Die Situation ist grundlegend anders, wenn Biohacker in Hackerspaces ohne juristische, organisatorische und finanzielle Infrastruktur arbeiten.

Die erste öffentliche Positionierung zu der Thematik kam von der Biohackerin Meredith Patterson mit ihrem vielbeachteten »Biopunk Manifesto«, das sie auf dem Symposium »Outlaw Biology? Public Participation in the Age of Big Bio« des UCLA Center for Society and Genetics vorstellte und in dem sie die Ideale der Cypherpunks (Selbstbezeichnung einiger Datenschutzaktivisten) auf Biologie und Citizen Science übertrug (Ledford 2010). Dabei betonte sie die Notwendigkeit der (natur)wissenschaftlichen Bildung als Voraussetzung einer Befähigung zur Wissenschaft/Forschung und unterstrich den Anspruch eines jeden Einzelnen an eine selbstständige wissenschaftliche bzw. forschende Betätigung. Sie hob das Verantwortungsbewusstsein und die Verantwortlichkeit der Biopunks hervor, verwahrte sich allerdings gegen den ihrer Meinung nach paternalistischen Ansatz des Vorsorgeprinzips, das ausschließlich eine forschungshemmende Wirkung habe.[151]

Die Skepsis gegenüber der Intention und den Auswirkungen des Vorsorgeprinzips, das in der Umweltgesetzgebung der EU (u. a. als Grundlage der Richtlinie 2001/18/EG), aber auch bei globalen Abkommen unter Leitung der UNO eine zentrale Rolle spielt (z. B. im Cartagena-Protokoll der Biodiversitätskonvention; Bundesregierung 2003), markiert bekanntermaßen wichtige Unterschiede in der Haltung zwischen Europa und Nordamerika gegenüber möglichen Risiken von Technologien im Allgemeinen und Biotechnologien im Besonderen – offensichtlich auch in der Biohackerszene. Durch die Ende der 2000er Jahre stärker werdende Diskussion über Ethik und Verantwortung in Kombination mit dem wachsenden Medienhype um das Thema Biohacking sahen sich viele Diskutanten auf der DIY-Biomailingliste berufen, die Entwicklung eines eigenen ethischen Kodexes anzugehen. Der entsprechende Reflexionsprozess, in Form von öffentlichen und privaten im Internet geführten Diskussionen, dauerte etwa ein Jahr, bis dann auf Initiative von Jason Bobe und dem

151 http://maradydd.livejournal.com/496085.html (30.11.2015)

WWICS zwei Tagungen organisiert wurden, im Frühjahr 2011 in London und im Sommer 2012 in San Francisco. Die Diskussion mündete in zwei verschiedenen Code-of-Ethics-Entwürfen, einem der europäischen und einem der nordamerikanischen Delegation (Tab. VI.1).

Unterschiede zeigen sich an verschiedenen Stellen, zum Beispiel beim Unterpunkt Bildung (»education«). Während die Mitglieder der nordamerikanischen Delegation (größtenteils Vertreter von Community Labs; Kasten VI.3 in Kap. VI.4) hier nur die Chancen (»possibilities«) thematisieren, nimmt die europäische Szene grundsätzlich die Vorteile und Auswirkungen (»benefits and implications«) in den Blick (Engelhard/Hagen 2012, S. 35).

TAB. VI.1 GEGENÜBERSTELLUNG DER EUROPÄISCHEN UND DER NORDAMERIKANISCHEN VARIANTE DER DIY-BIOETHIKKODEXENTWÜRFE (UNTERSCHIEDE KURSIV)

| europäischer »Code of Ethics« Entwurf Mai 2011 | nordamerikanischer »Code of Ethics« Entwurf Juli 2011 |
|---|---|
| *Modesty:*<br>*Know you don't know everything.* | *Tinkering:*<br>*Tinkering with biology leads to insight; insight leads to innovation.* |
| *Respect*:<br>Respect humans and all living systems. | *Environment*:<br>Respect the environment |
| Transparency:<br>Emphasize transparency and the sharing of ideas, knowledge, data *and results*. | Transparency:<br>Emphasize transparency and the sharing of ideas, knowledge, knowledge and data. |
| Safety:<br>Adopt safe practices. | Safety:<br>Adopt safe practices. |
| Open Access:<br>Promote citizen science and decentralized access to biotechnology. | Open Access:<br>Promote citizen science and decentralized access to biotechnology. |
| Education:<br>*Help educate* the public about biotechnology, *its benefits and implications*. | Education:<br>*Engage* the public about *biology*, biotechnology and *their possibilities*. |
| Peaceful Purposes:<br>Biotechnology *must* only be used for peaceful purposes. | Peaceful Purposes:<br>Biotechnology *should* only be used for peaceful purposes. |
| *Responsibility:*<br>*Recognize the complexity and dynamics of living systems and our responsibility towards them.* | |
| *Accountability:*<br>*Remain accountable for your actions and for upholding this code.* | |
| *Community:*<br>*Carefully listen to any concerns and questions and respond honestly.* | |

Quelle: nach Eggleson 2014 und http://diybio.org/codes

Weitere Wesensunterschied zwischen den beiden Codes zeigen sich in den Formulierungen zu Bescheidenheit (»modesty«), Verantwortung (»responsibility«), Haftung (»accountability«) und Gemeinschaft (»community«) (Tab. VI.1; Bowser/Shanley 2013; Eggleson 2014). In der europäischen Variante wird eine selbstreflexive und verantwortungsvolle Haltung der Biohacker betont, während

im nordamerikanischen Code das Basteln (»tinkering«) hervorgehoben wird, im Sinne eines emanzipatorischen und innovativen Umgangs mit Biologie durch »learning by doing«. Die unterschiedliche Ausrichtung ist dabei offenbar im regulatorischen und kulturellen Kontext begründet, in dem sich Biohacker in den USA und Europa bewegen. Während in Nordamerika durch die Terrorerfahrung der Biosecuritydiskurs dominierte, ist in Europa die Sensitivität gegenüber umweltpolitischen Themen merklich größer (Seyfried et al. 2014).

Ein wesentlicher Unterschied des europäischen *und* des nordamerikanischen »Code of Ethics« im Vergleich zum »Biopunk Manifesto« Pattersons liegt in der Aussage, »safe practices« anzuwenden. Dies impliziert – zumindest in Europa – die praktische Anwendung des Vorsorgeprinzips in Form einer Befolgung der Gentechnikregulierungsvorschriften (Kasten VI.4 in Kap. VI.4.4).

Das iGEM-Team Freiburg von 2011 entwickelte als Reaktion aufbauend auf die europäische Tagung zum »Code of Ethics« – und in Anlehnung an den Hippokratischen Eid – einen »Synbio Oath«. Inhaltlich den Aussagen des europäischen »Code of Ethics« sehr ähnlich, geht er aber als verbindliche Selbstverpflichtung in Form des Eids über einen bloßen Kodex hinaus. Er wurde 2011 auf dem ersten europäischen iGEM-Jamboree präsentiert. Bereits 2009 empfahl das iGEM-Organisationskommite gemeinsam mit dem damaligen Leiter der The Biological Weapons Convention der UN, Piers Millet, gezielt die Entwicklung eigener Kodizes und führte damit die Bestrebung der DIY-Biocommunity fort, einen möglichst gemeingültigen Code zu etablieren.[152]

Ein »Code of Ethics«, der von Studenten und Biohackern selbst für die Teilnahme an iGEM entwickelt wird, könnte junge Studenten der Synthetischen Biologie von Anfang an mit der ethischen, ökologischen und sozialen Dimension ihrer Arbeit vertraut machen. Die Vorarbeiten in der DIY-Bioszene aufgreifend böte sich im Rahmen von iGEM auch die Chance, einen internationalen und insbesondere transatlantischen Dialog über Wertevorstellungen und Ziele der Personen, die sich mit der Synthetischen Biologie befassen, zu fördern. Es hängt dabei aber maßgeblich von den Organisatoren des Wettbewerbs ab, wie tief eine solche Auseinandersetzung gehen kann und welchen Stellenwert sie bekommt.

Alle Bestrebungen, ethische Spielregeln für die Szene einzuführen, bleiben jedoch de facto unverbindlich, da es an Mechanismen mangelt, diese durchzusetzen und gegebenenfalls Fehlverhalten zu sanktionieren. So sieht beispielsweise auch die IAP (2014) noch viel (Auf-)Klärungsbedarf bei den Wissenschaftlern und der Öffentlichkeit und empfiehlt die Weiterentwicklung der »Codes of Conduct« für die Synthetische Biologie unter expliziter Einbeziehung der DIY-Bioszene. Auch wenn die Codes bisher nicht bindend sind, so sind sie für die Szene vor allem für die Identitätsbildung als Gruppe und als Signal an die Öffentlichkeit über die eigenen Ziele und Anliegen von Bedeutung. Das Thema wird regelmäßig auf den internationalen Treffen aufgegriffen. Darauf aufbauende Überlegungen flossen z.B. in die Entwicklung des Bio-Commons-Konzepts mit ein (Kap. VI.3.6).

## Fragen zur Freiheit der Wissenschaft 3.2

Der Begriff »Freiheit« spielt in der Debatte rund um die DIY-Biotechnologie, aber auch um die Synthetische Biologie eine große Rolle – teils explizit, teils implizit. Ein typisches Narrativ der

152 http://2009.igem.org/Security (30.11.2015)

DIYbio als Citizen Science ist das »Aufbrechen der Elfenbeintürme« bzw. eine »Demokratisierung von Wissenschaft«, die dazu führen soll, dass Bürger mehr Freiheiten gewinnen.

Die Autoren des Artikels »Wir Genbastler« (Charisius et al. 2012) schrieben, dass »die allermeisten wichtigen Entdeckungen [...] Menschen gemacht [haben], die die Freiheit hatten, ohne Einschränkung zu forschen. Oder die sich diese Freiheit nahmen.« Allerdings lassen sie offen, worauf sie ihre Annahme gründen. Sie veranschaulichen weder, was ihrer Meinung nach eine »wichtige Entdeckung« ist, noch, was genau dazu zählt, »ohne Einschränkung zu forschen« (Potthof 2013, S 11).

Einen anderen Aspekt der Freiheit betonten viele der von Engelhard und Hagen (2012) befragten Synbio-Wissenschaftler, die darauf verwiesen, dass die neuen technischen Möglichkeiten einen viel größeren experimentellen Gestaltungsspielraum und somit einen größeren Freiraum bei der gedanklichen Entwicklung der Experimente bewirken.[153] Die resultierende Freiheit, Dinge zu tun, die vorher nicht möglich waren, wurde von vielen als zentrale Motivation angesehen, zur Synthetischen Biologie zu wechseln, und sei prägend für die oft als neu empfundene Forschungskultur (Engelhard/Hagen 2012, S. 21 f.). Im Freiheitstopos ist somit eine deutliche Parallele zwischen den Erfahrungen und Motivationen der institutionellen Wissenschaftler in der Synbio und den Akteuren der DIY-Bioszene zu finden.

Studenten, die am iGEM-Wettbewerb teilnahmen und daraufhin begannen, sich als Biohacker zu betätigen, stellen dabei eine personelle Kontinuität zwischen den beiden Bereichen her und beeinflussen die Bestrebungen und Vorstellungen in der DIY-Bioszene von dem, was machbar ist und sein sollte, und beleben deren offenen und transdisziplinären Ethos.

Es bleibt jedoch unklar, inwiefern sich diese neue Forschungskultur substanziell von der vergangener Entwicklungsphasen der Wissenschaft unterscheidet. Potthof (2013, S. 10) argumentierte, dass Neuheit ein ständiger Begleiter von Wissenschaft, Forschung und Entwicklung sei und somit die Freiheit, neue Dinge tun zu können, nichts Spezielles sei, sondern Forschern früherer Jahrgänge ebenso vergönnt war. Beispiele aus der Vergangenheit seien die neuen Möglichkeiten und Einsichten durch den erstmaligen Einsatz von Computern oder Elektronenmikroskopen.

Eine Erklärung für das Freiheitsbestreben der Biohacker liegt in den derzeit etablierten universitären Strukturen und deren betrieblichen Alltag. Dieser ist gespickt mit als einengend empfundene Arbeits- und Lernbedingungen in den Instituten, bedingt durch zahllose Regeln, Verpflichtungen, Hierarchien, Abhängigkeiten und Erfolgsdruck. Eine häufig vorgebrachte Motivation zur Beteiligung in der DIY-Bioszene für Studenten und universitäre Wissenschaftler sind mangelnde Entfaltungsmöglichkeiten und Berufsperspektiven an ihren Instituten. In der Wissenschaftszeitschrift »Nature« (2013) wurden in einem Editorial die Aktivitäten der DIY-Bioszene zwar als weitgehend unseriös beurteilt, aber im selben Kontext die Relevanz des Freiheitsgewinns der Akteure in der Szene hervorgehoben. Dabei erscheint die neue Freiheit nicht nur als das Resultat neuer oder besserer »spielerischer« Methoden, sondern ebenso als Folge des Verlassens der institutionalisierten Forschungskultur. Ähnlich argumentierte Baker (2015, S. 112), die darauf hinwies, dass DIY-Biologie sich in Richtung einer Karrieremöglichkeit für Nachwuchsforscher der Synbio entwickle und dadurch neue Freiheiten eröffne.

153 Engelhard und Hagen (2012) haben für ihr Gutachten Interviews mit 22 Forschern im Bereich der Synthetischen Biologie (13) sowie thematisch ausgewiesenen Experten aus den Sozial-, Geistes- und Rechtswissenschaften (4) und aktiven Künstlern (5) geführt.

Potthof (2013, S. 18) hinterfragte allerdings den eingangs erwähnten Anspruch mancher DIY-Aktivisten auf eine »Demokratisierung der Wissenschaft« im Hinblick auf ihren Beitrag zu einer breiter angelegten gesellschaftlichen Emanzipation. Zwar können jede Nutzung von biotechnologischem Equipment und die eigenständige Durchführung biotechnologischer Verfahren und Experimente außerhalb der üblichen professionellen Kontexte als Ausdruck einer als positiv anzusehenden Selbstermächtigung gewertet werden. Eine solche Selbstermächtigung erweitere die Handlungsspielräume der beteiligten Akteure, wie beispielsweise Aktionen der Künstler des Critical Art Ensemble oder von Hybrid Video Tracks veranschaulichen (Kap. 2.1). Diese Selbstermächtigung sei jedoch derzeit in der Regel gepaart mit sehr individuellen und wenig politischen Interessen. Daher sind seine grundsätzlich positiven Einschätzungen mit großen Vorbehalten verbunden, insbesondere aufgrund der antiregulatorischen Bestrebungen, welche die verschiedenen Erscheinungen von DIY-Biotechnologien und Synthetischer Biologie begleiten (Potthof 2013, S. 18). Um zu beurteilen, ob die DIY-Bioszene als Teil einer emanzipatorischen Bewegung gewertet werden kann, sei es daher immer noch zu früh.

Ob Pothoffs (2013) Einordnung der DIY-Bioszene als »Bewegung« treffend ist, erscheint allerdings fraglich. Eine Politisierung und Einigung hinter einer gemeinsamen Idee wird es aufgrund der zuvor beschriebenen sehr unterschiedlichen Motive, Haltungen und Fragestellungen unter den Biohackern wohl kaum geben können, zumindest nicht im Sinne etablierter politischer Lager oder Positionen. Das bedeutet jedoch nicht, dass die Akteure der Szene generell unpolitisch sind oder keinen politischen Einfluss nehmen könnten. Kera (2012) sieht Hacker als »›Anonymous‹ and collective force, tricksters and jokers rather than typical revolutionaries«, die ohne konkrete Agenda, nur lose und spontan in einzelnen Aktionen als Gruppe in Erscheinung treten. Dergestalt kann die Szene sehr schnell auf neue Situationen reagieren und sich neuen technischen und gesellschaftlichen Entwicklungen flexibel anpassen. Ob eine Aktion dann affirmativ oder kritisch ausfällt, ist kontextabhängig. Widersprüchliche Positionen in der Szene sind somit eher die Regel als eine Ausnahme.

## DIY-Bio und der institutionalisierte Wissenschaftsbetrieb 3.3

Den meisten der von Engelhard/Hagen (2012) befragten Synbio-Fachleute war die DIY-Biologie zwar ein Begriff, lediglich zwei jedoch kannten konkrete Projekte (darunter Ellen Jorgensen von Genspace). Diese relative Unbekanntheit deutete bereits darauf hin, dass die DIY-Biologie in der Vergangenheit keinen relevanten Einfluss auf die institutionelle Forschung hatte. Als wichtigste Argumente für eine grundsätzlich fehlende Einflussmöglichkeit wurde genannt, dass die Forschung zu teuer sei, ein voll ausgerüstetes Labor benötigt werde und dass Laienwissen nicht ausreiche, um ernsthafte Forschung zu betreiben (Engelhard/Hagen 2012, S. 36). Einer der befragten Forscher sah in der DIY-Bewegung ein temporäres Phänomen, da man nur in der Anfangsphase einer neuen Technologie mit relativ einfachen Mitteln eine Nische finden und eventuell Erfolg haben könne. Nediljko Budisa sieht gar einen Konflikt zwischen dem Wunsch nach gesellschaftlicher Teilhabe an der Forschung und dem Glaubwürdigkeitsanspruch, den die Gesellschaft an die Wissenschaft hat. Glaubwürdige Forschung könne, so Budisa, nur auf Grundlage einer soliden Ausbildung betrieben werden und das sei in der DIY-Bioszene häufig nicht gegeben. Insgesamt räumten die befragten »institutionalisierten« Forscher der DIY-Biologie kaum Chancen ein, etwas relevantes Neues zur Forschung beizutragen (Engelhard/Hagen 2012, S. 37 f.). Auch durch Gleich und Giese wurde im Rahmen einer projektinternen Diskussion die Kompetenz der DIY-Bioszene infrage gestellt, Forschung reproduzierbar, methodisch korrekt und transparent dokumentiert durchzuführen.

Am ehesten wurde ein gewisser Nutzen in Bezug auf die Akzeptanzbildung in der Öffentlichkeit vermutet. Allerdings wurde kritisiert, dass die Garagenbiologie die Risikodiskussion über die Synthetische Biologie in der Öffentlichkeit verstärken könnte und dies dann striktere Regulierungen für die institutionalisierte Forschung mit sich bringen könne.

Demgegenüber wurde in einem Editorial von »Nature« (2010) ein möglicher positiver Beitrag der DIY-Bioszene betont: »Biohackers are an example of the growing ›citizen science‹ movement, in which the public takes an active role in scientific experiments. Citizen science can help stimulate public support for science, and can introduce fresh ideas from novel disciplines«.

2011 stellte Ellen Jorgensen Genspace[154] auf der »SB5.0: the Fifth International Meeting on Synthetic Biology« (organisiert von der BioBricks Foundation [BBF]) u. a. mit dem Satz »An informed and scientifically literate public is an essential part of synthetic biology advocacy.« vor und gewann daraufhin den einzigen Posterpreis in der Kategorie »Science and Society«. In der Preisbegründung wurde ausdrücklich die Leistung der »Community Labs« gewürdigt, die Akzeptanz für die Synthetische Biologie in der Öffentlichkeit zu erhöhen. Hier wird ein Interesse der institutionalisierten Forschung deutlich, die DIY-Biologie, beziehungsweise genauer die Community Labs, für die Öffentlichkeitsarbeit zu nutzen (Engelhard/Hagen 2012, S. 34 f.).

Einen konkreten Einfluss auf Aktivitäten der institutionalisierten Forschung hat die DIY-Bioszene seit einigen Jahren durch den iGEM-Wettbewerb. Das iGEM-Team ArtScience Bangalore von 2009 unter Leitung von Yashas Shetti, dem Mitbegründer von Hackteria, gehörte zu den frühesten Protagonisten der Szene. Es baute – aus der Not heraus, da kein geeignetes biotechnologisches Labor dauerhaft zur Verfügung stand – aus Haushaltsgegenständen eigene Laborgeräte zusammen. Dieser Jugaadansatz (Kasten VI.1) und insbesondere die damit verbundene künstlerische Auseinandersetzung mit Synthetischer Biologie wurden auf dem iGEM-Kongress 2009 mit Interesse aufgenommen. Der Einfluss des Teams war so stark, dass mittlerweile derartige künstlerische Interpretationen durch Vergabe eigener Preise gezielt gefördert werden.[155] Darüber hinaus hat das iGEM-Team Freiburg 2011 den »Synbio Oath« im iGEM-Wettbewerb vorgestellt, das iGEM-Team University College London führte 2012 eine umfangreiche Umfrage unter Biohackern durch. Im iGEM-Wettkampf 2014 wurde eine Extrakategorie »Community Labs« für die DIY-Bioszene eingeführt, mit einer gesonderten Vortragsreihe und speziell ausgelobten Preisen.[156] Nach einer Ausstellung der Biohacker Martin Malthe Borch und Rüdiger Trojok im Medical Museion in Kopenhagen[157] griff die Kopenhagener Universität den Citizen-Science-Ansatz auf. Es wurde ein OpenPCR-Gerät (Kap. VI.5.1) eingekauft und von einem Wissenschaftlerteam begutachtet sowie das Open-Knowledge-Konzept in Hinblick auf Geräte, Materialien, Gene und Information diskutiert. In einem Interview mit Radio 24syv betonte Birger Lindberg Møller die wichtige Rolle, die Universitäten gegenüber der Amateurbewegung haben, die ordentliche und ethische Durchführungen von Experimenten zu fördern, aber auch sich von der Philosophie und dem Enthusiasmus dieser neuen Bewegung inspirieren zu lassen.[158] Die meisten der von der DIY-Bioszene durchgeführten Experimente und Projekte erscheinen im Kontext der institutionalisierten Forschung nach den dort gültigen Standards zwar als wenig relevant. Dennoch besitzt die DIY-Bioszene zumindest einen erheblichen

154 www.genspace.org (30.11.2015)
155 http://2014.igem.org/Tracks/Art_Design (30.11.2015)
156 http://2014.igem.org/Tracks/Community_Labs (30.11.2015)
157 http://healthsciences.ku.dk/news/news2013/biohacking (30.11.2015)
158 http://synbio.ku.dk/news/diybio_radio24syv (30.11.2015)

Neuheitswert und kann Wissenschaftlern und Amateuren durch eine spielerische Umgangsweise einen positiven Forschungsgeist vermitteln und darüber hinaus neue Optionen der Interaktion zwischen der Bevölkerung und den Biowissenschaften eröffnen.

## Phase III: DIY-Biogründerzeit 4.

Die Hauptbeschäftigung der meisten Biohacker war und ist das Sammeln und Herstellen von Laborgeräten. In Heimlaboren (auch Egolabs genannt) und Hackerspaces haben Biohacker in den letzten Jahren eine Reihe von biologischen Experimenten entworfen oder Laborprotokolle und Geräte vereinfacht und nachgebaut. Durch die seit Beginn der 2000er Jahre zunehmende globale Vernetzung erreichten um das Jahr 2008 herum in großen Ballungszentren lokale Gruppen eine kritische Anzahl an Teilnehmern, ab der es finanziell und organisatorisch möglich wurde, sich eigene physische Orte für angedachte Projekte einzurichten. Diese sogenannten Hackerspaces (Kasten VI.3) ermöglichen Biohackern, durch Aufteilen der Kosten auf eine größere Personengruppe aufwendigere Labore zu unterhalten und somit die technischen Möglichkeiten der Akteure zu erweitern. Entweder gaben bereits bestehende Hackerspaces Biohackern Raum für ihre Projekte, oder es fanden sich neue Gruppen zusammen, um ein eigenes Labor zu eröffnen. Die dort durchgeführten Arbeiten haben Kunst, Bildung, Gesellschaftskritik und technologische Innovation zum Thema. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Interessen künstlerischer oder wissenschaftlicher Natur, beides oder keines der beiden oder ob sie nur für die Aktiven selbst relevant sind. Die gemeinsamen Merkmale der Hackerspaces sind ihre durchlässigen Strukturen mit flachen Hierarchien, transdisziplinäres Arbeiten, das bis zur völligen Auflösung der Disziplinen reicht, und Offenheit für Unkonventionelles. Dabei wird Wert auf Bildung – dem humboldtschen Ideal der Allgemeinbildung folgend – und Kommunikation mit der Öffentlichkeit gelegt. Durch den freien Zugang soll grundsätzlich allen interessierten Bürgern ermöglicht werden, selbst im Labor zu experimentieren und zu basteln, ohne die formalisierten, exklusiven und häufig veralteten Lehrmethoden von Schulen und Universitäten und ohne selektive universitäre Aufnahmeprüfungen, Leistungsdruck im Studienalltag und frei von Diskriminierung aufgrund des Alters oder Geschlechts. Die Hackerspaces ziehen daher Menschen aller Schichten an, darunter Grundschüler, Studenten, Künstler, Designer, professionelle Wissenschaftler bis hin zu Silicon-Valley-Unternehmern, die aus der Computer- in die Biotechbranche umsatteln möchten. In den lockeren Strukturen der gemeinschaftlichen Workshops verschwimmt neben den Disziplingrenzen häufig auch die Unterteilung in Lehrende und Lernende. Die meisten Orte werden gemeinnützig betrieben. Je nach Land gibt es für manche Hackerspaces öffentliche Förderung, zumeist versuchen sie sich jedoch durch Mitgliederbeiträge und Spenden zu finanzieren. Mittlerweile gibt es weltweit mindestens 60 Hackerspaces mit Biologiebezug, die große Mehrheit davon in Nordamerika und Europa.

**KASTEN VI.3: HACKERSPACES**

Hackerspaces, manchmal auch als Makerspaces oder Community Labs bezeichnet, sind eine Mischung aus Büros und Werkstätten bzw. Laboren für alles Mögliche. In den meist als Verein organisierten Community Labs finden Vorträge, Kurse und Diskussionsforen statt. Über soziale Netzwerke sind die Hobbyforscher und Bastler vernetzt und tauschen Ergebnisse, Protokolle und Baupläne selbstgebauter Geräte aus. Die meisten Hackerspaces haben einen Schwerpunkt auf Elektronik und Computertechnik, aber auch sogenannte »dirt rooms«, in denen Holz, Metall

und andere Baustoffe verarbeitet werden können, sind sehr häufig zu finden. Hackerspaces bekommen häufig neben den finanziellen Beiträgen der Mitglieder Sachspenden von Unternehmen. Dabei handelt es sich beispielsweise um Elektroschrott oder funktionierende Altgeräte, die dann in den Hackerspaces repariert oder ausgeschlachtet werden. Generell ermöglichen Hackerspaces ihren Mitgliedern einen sehr günstigen Zugang zu Materialien und Wissen und lassen einen maximalen Freiraum für eigene Projekte und Ideen ohne festgelegte Ziele oder kommerzielle Erwartungen. Dies fördert Interdisziplinarität und eröffnet intellektuelle Freiräume. Neben eigenen Projekten werden häufig auch Kurse und Seminare für Mitglieder und die Öffentlichkeit veranstaltet. Eine oft gewählte Organisationsform ist die Meritokratie als eine auf offenen Diskussionen beruhende Struktur. Wer sich am meisten engagiert und am meisten Sachverstand besitzt, genießt den größten Respekt und bekommt dadurch mehr Einfluss auf interne Entscheidungen. Andere Hackerspaces werden von basisdemokratischen Vereinen oder seltener auch von privaten Unternehmen getragen. Der c-base e. V.[159], der erste Hackerspace weltweit, wurde 1995 in Berlin gegründet. Mittlerweile gibt es global über 1.800 von »Hackerspaces.org« registrierte Hackerspaces (Stand: Dezember 2014), mit einer vermutlich deutlich höheren Dunkelziffer.

## DIY-Bioorte 4.1

Der erste Biohackerspace war allerdings das House of Natural Fiber (HONF)[160] in Yogjakarta, Indonesien, das 1999 von einer Gruppe von Künstlern und Designern um Venzha Christ gegründet wurde. Es ist damit ein Teil der Pioniere in der Kunstszene (Kap. VI.2.1) und wurde durch das Hackterianetzwerk auch in der westlichen Welt bekannt. Beispielhafte Projekte des HONF sind das Konstruieren von kleinen und günstigen Spektrometern zur Messung von Schadstoffen in örtlichen Gewässern sowie Lehrkurse für traditionelle Fermentationstechniken.

In den USA sind BioCurious in San Francisco und Genspace in New York die prominentesten Hackerspaces. BioCurious[161] wurde 2009 von einem Team um den Biologen Tito Jankowski, Erfinder des OpenPCR-Geräts (Kap. VI.5.1), und die Unternehmerin Eri Gentry durch eine Crowdfundingspendenaktion auf »Kickstarter.com« ins Leben gerufen. Der Hackerspace betreibt ein Labor, das für molekularbiologische Arbeiten ausgelegt ist und bietet bis zu 30 Personen Arbeitsplätze sowie Raum für Vorträge. Er ähnelt vom Stil her einer Schule, und das Arbeiten unter Anleitung steht im Vordergrund. Die örtliche Nähe zu den Universitäten Stanford und Berkeley sowie dem Silicon Valley sowie die große Öffentlichkeitspräsenz geben dem Space eine besondere Stellung als Vorzeigeprojekt der DIY-Bioszene in den USA. Eri Gentry wurde 2013 vom Weißen Haus für ihr Engegament als Citizen Scientist mit dem »Champions-of-Change-Preis« ausgezeichnet.[162]

Genspace wurde 2010 in New York vom Journalisten Dan Grushkin und der Molekularbiologin Ellen Jorgensen gegründet. Es war das erste DIY-Biologielabor, das der Sicherheitsstufe 1 entspricht (Kasten VI.4 in Kap. VI.4.4). Ellen Jorgensen sammelte jahrelang Erfahrung in der biotech-

159 www.c-base.org/ (30.11.2015)
160 www.natural-fiber.com/ (30.11.2015)
161 http://biocurious.org (30.11.2015)
162 www.whitehouse.gov/champions/citizen-scientists (30.11.2015)

nologischen Industrie, bevor sie sich zu einem vollständigen Wechsel in die DIY-Biologie entschied. Sie hielt bei der TEDGlobal 2012 in Edinburgh einen Vortrag über die Biohackerszene (Lillie 2012).

In Europa ist die Waag Society[163], ein Institut für Kunst, Wissenschaft und Technologie in Amsterdam, mit ihrem »Open Wetlab« eines der renommiertesten Citizen-Science-Labore. Mit der ersten im Haus öffentlich durchgeführten Leichensektion steht die Waag Society in einer langen transdisziplinären Tradition von Kunst und Wissenschaftskommunikation. Diese erreichte durch Rembrandts Gemälde »Die Anatomie des Dr. Tulp« von 1632 Weltruhm – das Gemälde befindet sich noch immer vor Ort. Das Open Wetlab wird von dem Biotechnologen Pieter van Boheemen geleitet, IT-Unternehmer und Mitentwickler des DNA-Analysegeräts Amplino (Kap. VI.5.1). Im Open Wetlab, einem S-1-zertifizierten Biologielabor, werden sogenannte Do-it-with-others-Workshops[164] für die Öffentlichkeit angeboten. Das neueste Projekt ist die »Biohackademy«, ein mehrwöchiges Lehrprogramm, das den Teilnehmern beibringen soll, wie man auf günstige Art ein eigenes Molekularbiologielabor improvisiert.

Aktuell der größte Biohackerspace in Europa ist La Paillasse[165] in Paris (Meyer 2012; Sterling 2012). Der gemeinnützige Betreiberverein um den Gründer und Biologen Thomas Landrain erhielt Unterstützung für die Gründung von der Pariser Bürgermeisterin (Virginia 2013). Der Space ist mit einem funktionsfähigen Biotechnologielabor ausgestattet und bietet seit Kurzem auch Werkräume für Neurobiologie, Drohnentechnologie und Textilarbeiten an. Einige der Projekte des Space werden in der Kunstgallerie »La Gaîté lyrique« ausgestellt. Die Ausstattung für das Biotechnologielabor wurde von Genopole[166], dem größten Biotechnologiecluster Frankreichs, und der Pariser Stadtverwaltung gespendet. Der Hackerspace hat jedoch noch keine S-1-Lizenz. La Paillasse hat bereits zwei Ausgründungen in Lyon und in Manila auf den Philippinen, die zentral von Paris aus verwaltet werden.

In Österreich wurde 2013 das Open BioLab Graz Austria (OLGA)[167] als ein offenes Gemeinschaftslabor für Molekularbiologie und Biohacking gegründet und ist ein Teil des realraum – Verein für Technik in Kultur und Gesellschaft. Der Hackerspace OLGA hat ein voll ausgestattetes Molekularbiologielabor und ist nach S 1 zertifiziert. Die Gründungsmitglieder Alexander Murer, Bernhard Tittelbach und Martin Jost haben 2014 außerdem die Firma Briefcase Biotec GmbH gegründet (Kap. VI.5.1).

In Berlin gibt es seit 2010 Biotinkering e. V.[168], der in Zusammenarbeit mit dem Hackerspace Raumfahrtagentur[169] und der Kunstgalerie Art Laboratory Berlin in unregelmäßigen Abständen öffentliche Workshops zum Thema Molekularbiologie durchführt. Öffentlich engagierte Mitglieder des Vereins sind u. a. Lisa Thalheim und Rüdiger Trojok. Alle Mitglieder des Vereins haben aka-

163 https://www.waag.org/nl (30.11.2015)

164 Diese Bezeichnung trifft den Charakter der DIY-Biologie, v. a. der Hackerspaces, eigentlich viel besser als das »do it yourself« (das sich ja v. a. auf die Gegenüberstellung zu dem institutionalisierten Expertentum bezieht).

165 www.lapaillasse.org (30.11.2015)

166 www.genopole.fr (30.11.2015)

167 http://realraum.at/wiki/doku.php?id=olga:olga (30.11.2015)

168 https://www.biotinkering-berlin.de (30.11.2015)

169 www.raumfahrtagentur.org (30.11.2015)

demische Abschlüsse, die meisten sind Biologen. In den Räumen der Raumfahrtagentur hat Thalheim ein kleines molekularbiologisches Analyselabor eingerichtet. Trojok betreibt außerdem ein privates Egolab. Einige mikrobiologische Studien sind somit technisch machbar, transgene Experimente hingegen ohne Zulassung als S-1-Labor nicht erlaubt.

Weitere europäische Biohackerspaces sind das brmlab[170] in Prag, das Hackuarium[171] in Lausanne, der Biohackspace[172] in London, Biologigaragen[173] in Kopenhagen, Biotweaking[174] und das Universal Research Institut (UR)[175] in Zagreb, um nur ein paar zu nennen. Des Weiteren gibt es diverse Kleingruppen, Ateliers, Museen[176] und Labore in verschiedenen Stadien der Entwicklung. Neben den gruppenbasierten Konzepten in Hackerspaces gibt es eine Reihe von Einzelpersonen, die in Egolabs eigene Versuche durchführen. Bemerkenswert dabei ist, dass es auch schon Personen ohne akademische biologische Vorbildung gelungen ist, Versuche wie PCR, Gelelektrophorese und Genmanipulation eigenständig und erfolgreich durchzuführen. So hat der Ingenieur für Mikrotechnologie und Erfinder Urs Gaudenz in seinem Egolab namens »GaudiLabs«[177] eine Reihe hochmoderner Maschinen für die Biohackerszene konzipiert (Kap. VI.4.2). Diese stellt er mit ausführlicher Dokumentation auf dem »Hackteria-Wiki« und auf Youtube der Öffentlichkeit kostenlos bereit. Der prominenteste alleinarbeitende Biohacker ist der Biologie Cathal Garvey[178]. Er hat sich nach Abschluss seines Masters in Biologie eine S-1-Lizenz besorgt und arbeitete zwei Jahre lang allein in einem Kellerzimmer in der Wohnung seiner Eltern an einem neuen Plasmidvektor für Bacillus subtilis mit dem Ziel, ein Biohackerkit für Privatpersonen und Schulen zu Lehrzwecken herzustellen. Eine Fundraisingaktion, die ihm es ermöglichen sollte, ein marktreifes Produkt zu generieren, scheiterte jedoch, sodass er sein Vorhaben nicht weiter verfolgte (Regalado 2012).

## Technologieentwicklung und Projektbeispiele 4.2

Die weltweite Kollaboration der nach wie vor sehr kleinen Szene erleichtert die Anwendbarkeit von Laborprotokollen zusehends. Mit dem Anwachsen der Szene findet sich eine stetige wachsende Anzahl von im Internet dokumentierter Biohacks.[179] Mit voranschreitender Vereinfachung der Technologie erweitern sich auch entsprechend die Möglichkeiten für Biohacker. Der momentane Stand der Fähigkeiten von Biohackern in Bezug auf Elektronik und Geräte ist mit dem von professionellen Laboren Mitte der 1990er Jahre vergleichbar. In Bezug auf molekularbiologische Arbeiten ist die Situation zwiespältig. Einerseits stehen Unmengen an hochwertigen theoretischen Informationen frei im Internet zur Verfügung, andererseits hat man Schwierigkeiten, die Protokolle praktisch in nichtprofessionellen Laboren anzuwenden. Die »Paywalls« der Wissenschaftsverlage stellen zwar eine erhebliche Hürde, aber kein unüberwindbares Hindernis für den Informationsfluss dar. Wissenschaftliche Publikationen werden privat oder über Literaturverwaltungsprogramme wie

170 http://brmlab.cz (30.11.2015)
171 http://hackuarium.strikingly.com (30.11.2015)
172 http://biohackspace.org (30.11.2015)
173 http://biologigaragen.org (30.11.2015)
174 http://biotweaking.com (30.11.2015)
175 http://ur-institute.org (30.11.2015)
176 www.museion.ku.dk (30.11.2015)
177 www.gaudi.ch (30.11.2015)
178 www.indiebiotech.com; https://www.indiegogo.com/projects/indiebb-your-first-gmo (30.11.2015)
179 www.instructables.com/howto/biology (30.11.2015)

»Mendeley« weitergereicht. Die erhöhte Affinität der Internetnutzer und der akademischen Wissenschaftler selbst, ihr Wissen als Open Source zu teilen, fördert den Wissenstransfer quer durch die Szene und darüber hinaus maßgeblich. Die größten Schwierigkeiten für die Hobbybastler ergeben sich derzeit bei der Materialbeschaffung für ein Labor, der Erschließung von Räumlichkeiten und der dauerhaften Finanzierung derselben. Beim Beschaffen der Verbrauchsmaterialien, insbesondere der Chemikalien, stellen sich auch Fragen nach dem fachgerechten Umgang und der Entsorgung, was die Verwendung mancher Chemikalien außerhalb von professionellen Laboren ausschließt. Ein weiteres Hindernis ist, dass viele Firmen nicht an Privatpersonen liefern, da sie einen Imageschaden fürchten, wenn dies an die Öffentlichkeit gelangen würde. Der Biologe und Journlist Sascha Karberg hat diese Erfahrung persönlich gemacht, da sein Lieferant für Oligonukleotide, im Anschluss an seine DIY-Biorecherche, ihm mitteilte, ihn nicht weiter zu beliefern (Charisius et al. 2013a).

Die Erfahrung zeigt aber auch, dass derartige Probleme mit etwas mehr Zeitaufwand umgangen werden können, indem man bei kleinen Firmen, im Ausland oder über Bekannte mit einer Universitätslieferadresse bestellt. Howard Simon, ehemaliger Rechtsberater von DNA2.0, Inc., einer Gensynthesefirma in den USA, hat sich beispielsweise bereit erklärt, auch an Privatpersonen zu liefern. Die Kosten solcher Services übersteigen jedoch schnell das Budget der Biohacker. Es sind daher bisher vornehmlich Start-ups und professionelle Künstler, die in Kooperationen mit Universitäten arbeiten, welche diese Angebote in Anspruch nehmen.

In der DIY-Bioszene werden unterschiedlichste Projekte bearbeitet. Diese reichen von einfachen Züchtungsexperimenten und Fermentationstechniken über Genanalysen bis hin zur genetischen Manipulation von Organismen. Man kann davon ausgehen, dass die eingesetzten Technologien und Methoden prinzipiell funktionieren. Die Arbeiten werden allerdings nicht in wissenschaftlichen, begutachteten Fachzeitschriften veröffentlicht und erheben meist keinen »traditionellen« Anspruch auf Wissenschaftlichkeit. Manche der Arbeiten werden als Kunst aufgefasst und beispielsweise in Galerien ausgestellt. Gewissermaßen am anderen Ende des Spektrums der Aktivitäten bemühen sich einige Biohacker um die Entwicklung kommerzieller Anwendungen und Produkte. Beispiele für Firmengründungen werden in Phase IV genauer beleuchtet (Kap. VI.5.1).

Ein beliebtes Thema traditioneller Biologie in der DIY-Bioszene ist das »urban gardening«. Damit ist die Züchtung oder der Anbau von Pflanzen im städtischen Raum gemeint. Durch leicht selbst zu bauende, häufig computergestützte Systeme wird gewöhnliche Pflanzenzucht technisch aufgerüstet und durch diverse günstige Sensoren für Licht, $CO_2$, Feuchtigkeit und pH-Wert sowie Pumpsysteme und LED-Belichtung automatisch kontrollierbar gemacht. Oftmals werden für Urban-Gardening-Projekte[180] modernste Gewächshäuser auf Hausdächern oder ähnlichen Orten installiert.

Ein anderes traditionelles Anwendungsfeld sind Fermentationsprozesse wie Wein-, Essig- oder Käseherstellung. Beliebt ist in der Kategorie die Kultivierung des Bakteriums Gluconacetobacter xylinum, das ein Bestandteil von Kombuchakulturen ist und ein zelluloseähnliches Polymer produziert, dass man als Textilstoff verwenden kann. Die Designerin Suzanne Lee stellt mit dem Material beispielsweise Kleidung her und präsentiert das Prozedere als Biohacking.[181]

180 »Urban gardening« wird hier im internationalen Verständnis als urbane und dezentrale Agrartechnologie aufgefasst. Die in Deutschland häufige Praxis, »urban gardening« mit ökologischer Landwirtschaft zu kombinieren ist damit nicht explizit gemeint. Beide Praktiken überlagern sich nur teilweise.

181 https://www.youtube.com/watch?v=43gOAZ_mGmg (30.11.2015)

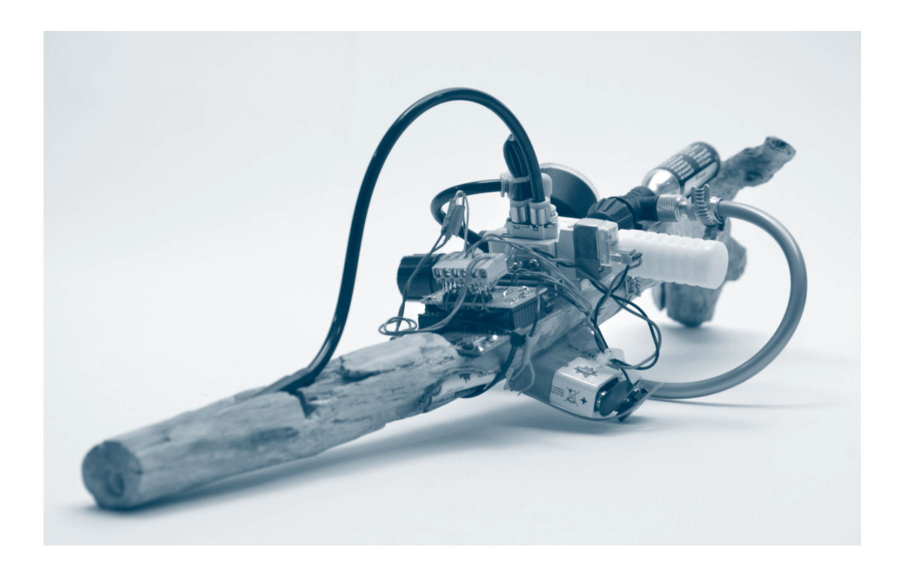
Ein globales Projekt der DIY-Bioszene, in das mehrere Dutzend Biohacker (u. a. Denisa Kera, Pieter van Boheemen, Martin Malthe Borch etc.) seit einigen Jahren involviert sind, ist die Workshopserie »BioStrike: Open Antibiotics Discovery« zum hochaktuellen Thema der sich ausbreitenden Antibiotikaresistenzen. Ziel ist es, ein Laienpublikum für das Thema zu sensibilisieren, indem einerseits aufgezeigt wird, wo überall resistente Bakterien auftreten und wie deren Verbreitungswege aussehen, und andererseits die Workshopteilnehmer dazu angeleitet werden, eigenständig nach neuen Antibiotika zu suchen. Mit verschiedenen mikrobiologischen Protokollen werden potenziell antimikrobielle Substanzen auf ihre Wirksamkeit getestet und die Ergebnisse im Internet ausgetauscht. Zwar sind die Erfolgschancen, etwas medizinisch Relevantes zu entdecken, erst einmal gering, der Bildungswert der Workshopserie aber ist ausgesprochen hoch.

Ein Beispiel für ein gelungenes Hacken von Hochtechnologie ist die »Dipolfalle« (auch »optische Pinzette« genannt), die von Mitgliedern des Hackterianetzwerks im GaudiLab 2013 (Kap. VI.4.1) entwickelt wurde. Eine Dipolfalle ist ein stark gebündelter Laser, mit dem man im Brennpunkt mikroskopisch kleine Partikel einfangen und frei im Raum bewegen kann, beispielsweise einzelne Bakterien. Die Geräte befinden sich im universitären Forschungsstadium und werden z. B. in hochmoderne Zeiss-Mikroskope eingebaut. Den Biohackern gelang es, eine Dipolfalle aus einem DVD-Brenner herzustellen, der mit einem aus einer Webcam improvisiertem Mikroskop kombiniert wurde. Das Gerät war prinzipiell funktionsfähig und ist mit Materialkosten von ca. 20 Euro rund 10.000-mal günstiger als kommerzielle Angebote.[182]

Ein anderer Hack moderner Biotechnologie ist eine aus Küchenutensilien gebaute »Gene Gun« (Genkanone) von Rüdiger Trojok (Abb. VI.3). Eine Gene Gun ist ein wissenschaftliches Luftdruckgerät, um DNA mithilfe von kleinen Goldpartikeln in Zellen zu schießen. Die damit hinzugefügte DNA kann dann in der Zelle von ihren Trägerpartikeln gelöst und ins Erbgut der Zelle eingebunden werden. Gene Guns gehörten in den 1990er Jahren zu den zentralen Arbeitsgeräten der Gentechnologie – viele der heute genetisch veränderten Pflanzen wurden mit dieser Technologie erzeugt. Das Gerät wurde aus einem Sahnespender, einem Druckluftschlauch und einer Kugelschreiberhülse improvisiert. Nach einigen Testversuchen im Hackerspace Biologigaragen wurde das Vorhaben, eine verlässlich funktionierende DIY-Gene-Gun aus Mangel an praktischem Nutzen eingestellt. Prototypen dieser Reihe wurden nach Einstellung der Entwicklung im Medial Museion in Kopenhagen und im Ars Electronica Center in Linz ausgestellt.

182 www.youtube.com/watch?v=BT6NgV5XQqQ (30.11.2015); http://hackteria.org/wiki/index.php/DIY_Laser_tweezer,_cell_trap,_oligo_synthesis (30.11.2015)

ABB. VI.3 KÜNSTLERISCHE INTERPRETATION DER »GENE GUN« VON R. TROJOK



Quelle: Martin Malthe Borch

Im Rahmen des Leuchtpflanzenprojekts des Biotechnologiestudenten Andreas Stürmer wurde 2014 einer Tabakpflanze das grün fluoreszierende Protein (GFP), ein bekanntes Markergen, übertragen. Dazu wurde das Gen in einen Agrobakterienstamm eingebracht, der in der Lage ist, das Gen in Pflanzenzellen zu schleusen. Anschließend wurden die Agrobakterien punktuell auf die Pflanze gestrichen. An den Kontakttellen erfolgte der Gentransfer und die Pflanze leuchtete, wenn sie mit UV-Licht bestrahlt wurde. Ziel des Projekts ist, letztendlich eine selbstständig leuchtende Pflanze zu erschaffen. Damit steht Stürmer in Konkurrenz zum US-amerikanischen Glowing-Plant-Projekt (Kap. VI.5.1). Der fluoreszierende Tabak wurde ebenfalls im S-1-Labor des Ars Electronica Centers ausgestellt.[183]

## Medienresonanz 4.3

Die DIY-Bioszene erzeugt in den USA seit 2009 und in Europa seit etwa 2012 eine in Anbetracht der wenigen Aktiven der Szene große Medienresonanz. Auch das TAB wurde vor allem durch die Berichterstattung auf das Thema aufmerksam. Der Tenor vieler Beiträge war in ähnlicher Weise gemischt: Einerseits wurden die Risiken einer dezentralisierten Gentechnologie hervorgehoben, andererseits aber auch die neuen Perspektiven, welche die DIY-Bioszene auf Biotechnologie und Synthetische Biologie eröffnet, herausgestellt. Das Narrativ oszillierte dementsprechend zwischen »Hype« und »Horror«. Biohacker wurden als potenzielle Terroristen skizziert, gleichzeitig ihr kreativer und unkonventioneller Ansatz als technologische Emanzipation gelobt. Die ausführlichsten Darstellungen in Deutschland bieten das Buch »Biohacking – Gentechnik aus der Garage« (Charisius et al. 2013b) sowie die thematisch identische Filmdokumentation »Die Gen-Köche « (Schlichter/Karberg 2012). Die Bewerbung durch das Bayerische Fernsehen bot das typische mediale Grundnarrativ (BR 2013): »Genforschung im Heimlabor? Das ist möglich, sagen die beiden Filme-

183 https://diyspartanbiotech.wordpress.com (30.11.2015)

macher und Biologen und wollen in ihrem Film den Beweis dafür liefern. Der hausgemachte Vaterschafts-Test, die genveränderte Tomate oder die Biowaffe aus dem Hobbyraum. Ein faszinierendes Feld, das gleichzeitig Angst macht.«

Dieses Muster findet sich in fast allen Darstellungen. Diverse Horrorvisionen, häufig in Verbindung mit »Killerviren«, wurden mehrfach von Journalisten in Druckmedien und Rundfunk skizziert (Karberg 2013a; Müller-Jung 2012; Scherer/Herzog 2014). Auffällig häufig ist eine Berichterstattung, die auf irrationalen Ängsten vor einer von den Journalisten selbstpostulierten Gefahr aufbaut, für die es keine realistischen Voraussetzungen gibt. Es gab jedoch auch eine Reihe neutral gehaltener Interviews (Wagner 2013) und positiver Darstellungen (Groß 2014). So brachte der Hessische Rundfunk die Biohackerszene in Verbindung mit einem Zitat von Bill Gates, um das Innovationspotenzial zu betonen (Dugge 2013): »›Wenn ich heute ein Teenager wäre, würde ich die Biologie hacken‹, sagt Microsoft-Gründer Bill Gates. Denn nicht nur Computer lassen sich hacken, sondern auch Gencodes. Und das machen sogenannte ›Biohacker‹ mit Leidenschaft.«

In der Krimiproduktion »Dina Foxx« des ZDF[184] tauchten Biohacker schließlich sogar als Weltretter auf, die eine von einem skrupellosen Pharmakonzern ausgelöste Seuche besiegen und gleichzeitig gegen terroristische Umweltaktivisten antreten müssen.

Die mediale Wahrnehmung der DIY-Bioszene ist also ähnlich vielfältig (und teils widersprüchlich) wie die Szene selbst. In den USA wurde zwischen 2008 und 2010 besonders häufig in prominenten Medien darüber berichtet. Dann ebbte der Hype jedoch schnell ab. In Deutschland startete er zeitverzögert, hält aber seit 2010 beinahe unverändert mit etwa 10 bis 20 Meldungen in den größeren Medien (Rundfunk, Zeitung) pro Jahr an. Dies resultiert gelegentlich in der Auffassung, Biohacking sei ein Trend, der aus den USA »herübergeschwappt« ist. Tatsächlich ist die europäische Szene aber sogar größer, aktiver und in etwa genauso alt wie die US-amerikanische. Die zeitverzögerte Berichterstattung scheint ein reines Medienphänomen zu sein. Die dargestellte Brisanz des Themas verschärfend, kommen die medienwirksamen Interventionen des FBI hinzu, welche die Szene seit Jahren beobachtet und gezielt mit ihr interagiert (Kap. IV.4.4). Insgesamt ist die mediale Aufmerksamkeit für die relativ kleine Szene von wenigen Hundert bis Tausend aktiven Hobbybastlern und nur wenigen Dutzend professionellen Vollzeittätigen enorm. Diese kann zu einem Teil mit dem unkonventionellen Auftreten einiger Akteure der Szene, der künstlerisch inspirierten und dadurch attraktiven Wissenschaftsdarstellung sowie einem neuen Pragmatismus in Bezug auf Technologie, zu einem anderen Teil mit der verbreiteten Gentechnikskepsis und Informationsasymmetrien in Bezug auf biowissenschaftliches Fachwissen vieler Journalisten und der Öffentlichkeit erklärt werden. Diese Mischung verleiht dem Thema eine übertriebene Dramatik – zumindest in Anbetracht der bisherigen technologischen Leistungen der Biohacker, die zwar etwas qualitativ Neues darstellen, deren reale Auswirkungen aber bisher eher bescheiden ausfallen.

## Biosicherheitsfragen 4.4

Die von Journalisten beschriebenen Gefahrenszenarien durch Biohacker sind nicht vorrangig eine Erfindung der Medien, sondern gehen u. a. auf frühere Einschätzungen von Sicherheitsbehörden und Stellungnahmen unterschiedlicher Gremien zurück. Die um 2008 global zunehmenden Onlineaktivitäten der DIY-Bioszene und die kurz darauf erfolgte Gründung neuer Biohackerspaces lösten

184 http://dinafoxx.zdf.de (30.11.2015)

in Expertenkreisen Diskussionen sowohl über Biosafety- als auch Biosecurityfragen aus (Kap. IV) (Bennett et al. 2009; Lloyd's 2009).

Es kamen Sorgen auf, Amateurwissenschaftler könnten versehentlich Unfälle auslösen, die Menschen und Umwelt betreffen (Bioerror), absichtliche kriminelle Handlungen durchführen (Biocrime), wie z. B. die Herstellung illegaler Drogen, oder sogar terroristische Aktivitäten bewusst oder unbewusst unterstützen (Bioterror). Prinzipiell muss man dabei zwischen klassischen bio(techno)logischen Methoden und moderner Gentechnologie (oder auch Synbio i. w. S.) unterscheiden. Sicherheitsexperten in den USA wurden vor allem wegen der zunehmenden Verbreitung der Techniken zu transgenem Arbeiten in Kombination mit der Verfügbarkeit von (potenziell gefährlichen) Gensequenzen in den großen wissenschaftlichen Biodatenbanken aufmerksam.

**BIOTERROR**

Die Befürchtung, dass von der Biohackerszene insbesondere Biosecuritygefahren als Folge gentechnischer Arbeiten ausgehen könnten, tauchte über Jahre immer wieder in unterschiedlichen Dokumenten auf (Pamlin et al. 2015; WEF 2014), meist ohne eine nähere Auseinandersetzung mit den tatsächlichen Möglichkeiten und Kapazitäten real existierender DIY-Biologen.

Die Befürchtungen bezüglich des Bioterrors gingen zumeist auf Jahre vorher entworfene Planspiele und Szenarien der US-amerikanischen Sicherheitsbehörden zum Thema Synthetische Biologie zurück (CIA 2003). Dabei wurde die Situation der Virenforschung in Hochsicherheitslaboren (Kap. IV.2) auf die noch junge DIY-Bioszene projiziert. Eine typische resultierende Annahme lautete, dass Terroristen gezielt die biotechnologischen Ressourcen der Biohackerspaces nutzen würden und mithilfe gentechnologischer Methoden biologische Kampfmittel, also hochtoxische Stoffe oder hochpathogene Krankheitserreger (bis hin zu genetisch aufgerüsteten »Killerviren«), entwickeln könnten.

Die befürchtete Erhöhung der Pathogenität ist allerdings nicht leicht zu erreichen (und wäre hochgefährlich für die Experimentatoren), viel näher liegt eine Vermehrung existierender Erreger (Kap. IV.2.3). Doch selbst »nur« diese in eine verbreitungs-, d. h. waffenfähige Form zu bringen, die großen Schaden anrichten kann, ist ebenfalls alles andere als simpel und erfordert umfangreiches Spezial- und Erfahrungswissen (»tacit knowledge«), das nur im militärischen Bereich vorliegen dürfte. So steht auch die Mehrzahl der Unfälle und Anschläge mit biologischen Stoffen in direktem Zusammenhang mit militärischen und geheimdienstlichen Aktivitäten. 2001 wurden beispielsweise die Anthraxanschläge in den USA von einem Mitarbeiter des US-Militärs durchgeführt, der Zugang zu den Erregern und entsprechendem Hochsicherheitslaborequipment im Militärlabor hatte (Warrick 2010).

Für die Gesamteinschätzung einer theoretischen gentechnologischen Bioterrorgefahr sind darüber hinaus zwei Randbedingungen zu berücksichtigen, die völlig unabhängig von der Art der Akteure und ihrer LaLaororganisation sind:

> Die Beispiele für Bioterror sind, was ihre Anzahl und die Opferzahlen betrifft, gegenüber Terroranschlägen mit konventionellen Waffen sehr gering.
> Die wenigen Beispiele der vergangenen Jahre gingen nicht auf die Nutzung gentechnischer Verfahren zurück.

In den letzten Jahren sind in wissenschaftlichen Zeitschriften mehrere Beiträge erschienen, in denen die zugrundeliegenden Annahmen in Bezug auf die DIY-Bioszene analysiert und die ursprünglich geäußerten Befürchtungen weitestgehend entkräftet wurden (Boheemen/Vriend 2014; Grushkin et al. 2013; Jefferson et al. 2014a u. 2014b; Landrain 2012; Revill/Jefferson 2014; Seyfried et al. 2014). Die Haupteinschätzungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

> Die Biohacker mit ihren technischen Möglichkeiten hinken noch deutlich denen professioneller Labore hinterher.
> Das Durchführen gentechnischer Arbeiten ist noch immer wissens-, zeit- und kostenintensiv. Erfolgreiche Entwicklungen transgener Produkte übersteigen die Kapazitäten einzelner Biohacker in den meisten Fällen deutlich.
> Zusammen mit einer bewusst praktizierten Kultur der Offenheit bzw. Öffentlichkeitsorientierung macht dies einen Missbrauch in öffentlich zugänglichen Hackerspaces viel weniger wahrscheinlich als in nichtöffentlichen Speziallaboren.
> Technisches Gerät und Gensequenzen allein bringen nicht viel; umfassendes Erfahrungswissen (»tacit knowledge«) ist ganz entscheidend.
> Letzteres kann über Jahre allerdings auch in Hackerspaces entstehen, daher sind eine Erfassung und Kontrolle gentechnischer Arbeiten – genauso wie in herkömmlichen Laboren – notwendig.
> Biowaffen im echten Sinn, die ernsthaft großen Schaden anrichten können, erfordern nicht nur biologisches, sondern (bio)waffentechnisches Wissen (und häufig auch entsprechende Trägersysteme), das nicht frei verfügbar ist.

**BIOCRIME**

Technische und kapazitative Hindernisse ergeben sich auch bei einem denkbaren kriminellen Einsatz von Methoden der Synbio i. w. S. Zieht man die bisherige Situation bei der Nutzung chemisch-synthetischer Technologien als Vergleich heran, erscheint die Herstellung von Drogen mit gentechnologischen Methoden allerdings als ein durchaus plausibles Szenario, da aufgrund des bestehenden Absatzmarktes für illegale Drogen und Dopingmittel prinzipiell vermutlich große Geldmittel auf dem Schwarzmarkt mobilisiert werden könnten. Von organisierten kriminellen Strukturen finanzierte und apparatemäßig professionell ausgestattete Labore dürften theoretisch durchaus das Potenzial erlangen können, synthetische Drogen mit gentechnischen Mitteln zu erzeugen. Allerdings können entsprechende geheime Labore, über die naturgemäß wenig in Erfahrung zu bringen ist, definitiv nicht zur DIY-Bioszene gezählt werden.

**BIOSECURITY INSGESAMT**

Eine Bioterrorgefahr aus Hackerspaces als Resultat gentechnischen Arbeitens erscheint insgesamt äußerst gering – so wie es bereits u. a. die PCSBI (2010a, S. 159) und das United Nations Interregional Crime and Justice Department (UNICRI 2012, S. 101 ff.) gefolgert hatten. Gentechnische Forschung und insbesondere ihre Nutzung zur gezielten Herstellung/Veränderung komplexer biologischer Funktionen ist auf eine Vielzahl an wissenschaftlichen Daten angewiesen und setzt i. d. R. ein etabliertes Netzwerk an Forschern voraus, die gemeinsam an den komplexen Aufgabenstellungen arbeiten. Eine Organisationsstruktur mit terroristischen oder kriminellen Zielen, die eine solche Aufgabe bewältigen könnte, dürfte sich innerhalb der global vernetzten, transparenten und auf Gemeinschaftlichkeit aufbauenden DIY-Bioszene kaum etablieren können. Die Gefahr fehlgeleiteter Einzeltäter scheint in offiziellen Laboren der biomedizinischen und militärischen (und/oder möglichen geheimdienstlichen) Forschung aufgrund der dortigen technischen Möglichkeiten, aber auch

der geringeren öffentlichen Kontrolle aller Voraussicht (und Erfahrung) nach viel größer zu sein. Nach einem Technologiesprung, der die technischen Möglichkeiten der DIY-Biologen deutlich erhöhen würde, könnte sich die Situation jedoch in Zukunft ändern. Hierzu werden Überlegungen in Kapitel VI.6 im Rahmen der Zukunftsszenarien angestellt.

**BIOSAFETY**

Wie sieht es aber mit ungewollten bzw. unbedachten Gefahren, also der Biosafety, aus? Auch hier geht es nicht um die DIY-Biologie als solche, sondern speziell um die Möglichkeiten gentechnischer Veränderungen bzw. die Risiken einer Freisetzung genetisch veränderter tatsächlich gefährlicher oder von (Teilen) der Gesellschaft nicht gewünschter Organismen (Mikroorganismen, Pflanzen oder Tiere). Eine Freisetzung könnte unbeabsichtigt oder theoretisch auch beabsichtigt sein. Wesentliche Kriterien zur Beurteilung sind hierbei das ökologische und gesundheitliche Gefahrenpotenzial sowie die Überlebensfähigkeit und damit das Ausbreitungspotenzial der Organismen in der Umwelt. Auch hier gilt, dass die Biohacker mit ihren technischen Möglichkeiten (noch) massiv hinterherhinken und umfassendes Erfahrungswissen ganz entscheidend sind; aber es ist fraglos, dass Biohacker GVO herstellen können (Beispiele finden sich in Kap. VI.4.2), und eine unerwünschte, potenziell gefährliche Situation kann nicht erst eintreten, wenn mit profundem Wissen gezielt gentechnische Veränderungen vorgenommen werden, sondern möglicherweise gerade unwissentlich.

Die Grundeinschätzung in Bezug auf bekannte (registrierte) bzw. öffentliche DIY-Labore muss von der deutschen bzw. europäischen Rechtslage ausgehen, die eine Durchführung gentechnischer Experimente nur in speziell zugelassenen Laboren erlaubt, von denen es unter den Hackerspaces, wie beschrieben, nur ganz wenige Beispiel in Europa gibt, die alle nur eine Lizenz für Arbeiten mit Organismen der niedrigsten Sicherheitsstufe haben (Kap. VI.4.1). In diesen gelten die gleichen Vorschriften wie in den unzähligen Gentechniklaboren an Universitäten und sonstigen Forschungseinrichtungen (Kasten VI.4).

Anders ist die Situation bezüglich gentechnischer Arbeiten in den USA, die nicht grundsätzlich reguliert sind, sondern in Abhängigkeit von bestimmten Verfahren und vom erwartbaren Produkt des jeweiligen Vorhabens (Kap. IV.1.3). Hierdurch benötigte beispielsweise das Glowing-Plant-Projekt keine behördliche Zulassung. Jedoch dürften selbst bei einer erfolgreichen Durchführung, die immer noch völlig unklar ist (Kap. VI.5.1), keine ernsten Umweltgefahren drohen (u. a. da kein Überlebensvorteil der leuchtenden Zierpflanzen resultieren dürfte).

Ein angekündigtes Projekt zur Herstellung transgener vaginaler Mikroorganismen (ob ernst gemeint oder nicht; Kap. VI.5.2) dagegen deutete schon in eine ganz andere Dimension von Biosicherheitsbedenken: Falls Biohacker beginnen sollten, das menschliche Mikrobiom (Gesamtheit aller auf und im Mensch lebenden Mikroorganismen) zu verändern, könnten Gesundheitsrisiken resultieren. Diese Gefahr ist schon jetzt nicht zu unterschätzen, weil sich hier auch in Europa bzw. Deutschland allem Anschein nach eine Regelungslücke öffnet. Weder das Gentechnik- noch das Arzneimittelgesetz erfassen eine von einer Person an sich selbst herbeigeführte Genveränderung; die Mikroben können danach jedoch theoretisch von Mensch zu Mensch übertragen werden und würden damit freigesetzt. Es ist bisher unklar, welche Art von Modifikation des eigenen Mikrobioms zulässig sein sollten bzw. wo deren Grenzen liegen. Es stellen sich daher also doch bereits jetzt Fragen nach den Möglichkeiten einer präventiven Kontrolle jenseits der o. g. Selbstverpflichtungen in Form des »Code of Ethics« sowie »diesseits« des bloßen Verweises auf die bereits schon restriktive Regulierung der Gentechnologie.

**PRÄVENTIVE KONTROLLE DER DIY-BIOLOGIE – DURCH SICHERHEITSBEHÖRDEN ODER DURCH OFFENEN GESELLSCHAFTLICHEN DISKURS?**

In den USA haben zivile Sicherheitsbehörden (insbesondere das FBI) die Aufgabe der Überwachung der Biohacker vor allem aus Biosecuritygründen übernommen. 2009 hat das FBI ein »Outreach Program«, d. h. ein Kontaktaufnahmeprogramm, zur DIY-Bioszene und damit verbundenen universitären Forschern gestartet und seitdem mehrere Workshops veranstaltet. Biohacker und Universitätswissenschaftler sind dazu aufgefordert, verdächtige Aktivitäten den in jeder Stadt der USA präsenten FBI-Agenten und »Weapons of Mass Destruction Coordinators« zu melden (Charisius et al. 2013a). Verdächtiges Verhalten ist laut Edward You, dem Leiter des »Outreach Program«, beispielsweise, sich nach Feierabend ohne offensichtlichen Grund im Labor aufzuhalten oder die Verwendung von Dual-Use-Chemikalien und -Materialien (Berger et al. 2012). Politisch aggressive Aussagen sollten ebenfalls gemeldet werden. Zum dritten »FBI DIYbio Outreach Workshop« 2012 wurden auch Biohacker aus Europa und Asien eingeladen. Auch Europäern wurden Kontaktwege zu FBI-Agenten, die sich vor Ort in europäischen Städten befinden, genannt, und sie wurden dazu aufgefordert, sich bei diesen zu melden. Die juristische Legitimität solcher Auslandsaktivitäten einer US-Bundespolizei erscheint dabei fragwürdig. Zudem bestehen ernsthafte Zweifel an der wissenschaftlichen Fachkompetenz des FBI. So gelang es der Behörde beispielsweise nicht, den Anthrax-Fall von 2001 wissenschaftlich korrekt aufzuklären. Das U.S. Government Accountability Office (GAO)[185] hat erst kürzlich im Auftrag des US-Kongresses einen Untersuchungsbericht dazu vorgelegt und die großen methodischen Schwächen des Vorgehens des FBI dokumentiert (GAO 2014).

Doch auch die DIY-Bioszene in den USA reagierte zumindest anfangs in Teilen misstrauisch, nicht zuletzt weil das FBI im Jahr 2004 den Kunstprofessor und Friedensaktivist Steve Kurtz fälschlicherweise als Bioterroristen angeklagt hatte. Kurtz hatte sich kritisch mit dem Biowaffenprogramm der US-Regierung auseinandergesetzt.[186] Dazu präsentierte er u. a. in Kunstaustellungen harmlose Bakterien, die er zu diesem Zweck in seinem improvisierten Heimlabor kultiviert hatte – völlig gefahrlos und legal (UNICRI 2012, S. 120). Die Bakterienkulturen wurden entdeckt, nachdem ein Feuerwehrmann vor Ort den plötzlichen Tod von Kurtz' Frau aufnahm und anschließend das FBI alarmierte, das daraufhin sofort mit biologischer Hochsicherheitsausrüstung und angeschlagenen Sturmgewehren sein Haus erstürmte. Kurtz selbst wurde 22 Stunden unter dem Verdacht des »Bioterrorismus« und des Mordes an seiner Frau verhört. Später wurde er des »Postbetrugs« angeklagt, doch erst 2008 wurde der Fall wegen mangelnder Beweislage endgültig zu den Akten gelegt (Critical Art Ensemble/Institute for Applied Autonomy 2009; Kurtz 2005).

Dieser Vorfall erzeugte Unsicherheit und Furcht unter Wissenschaftlern sowie Biohackern und führte teils zu abwehrenden, teils zu anbiedernden Reaktionen auf die späteren Outreachaktivitäten des FBI. Letztlich passten sich viele DIY-Biologen den Wünschen des FBI an. Daniel Grushkin von Genspace schrieb zwar einige kritische Artikel über die Einmischung des Militärs in die Biotechnologie, kooperierte aber gleichzeitig mit dem FBI. Seine Motivation ist, durch eine positive Fürsprache des FBI für DIY-Biologie einen besseren Stand in der Öffentlichkeit zu bekommen, da das Genspaceteam ansonsten aggressive Reaktionen extremistischer religiöser Gruppen oder von Umweltaktivisten befürchten müsse. Mackenzie Cowell von »DIYbio.org« sagte dazu: »I think it's a

---

185 Das GAO ist assoziiertes Mitglied des europäischen Netzwerks parlamentarischer TA-Einrichtungen EPTA (www.eptanetwork.org/)(30.11.2105).

186 www.artscatalyst.org/marching-plague (30.11.2015)

good thing that [Ed You (FBI Agent) is] part of the community – there's a shadow of it feeling sinister, but for the most part it's cool…. If we're going to walk the walk, we have to be able to talk to the FBI.« (nach Lempinen 2011)

Auch das US-amerikanische Militär interessiert sich seit geraumer Zeit verstärkt für Synthetische Biologie und Biohacking. Die Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) und die Defense Threat Reduction Agency (DTRA) finanzieren direkt Aktivitäten von Hackern und Biohackern bzw. planen dieses.[187]

In Europa bzw. in Deutschland ist die Situation der DIY-Bioszene eine grundlegend andere. Die Bioterrorsorgen der Sicherheitsbehörden sind anscheinend deutlich niedriger als in den USA, Aktivitäten in Richtung Biohacker sind bislang unbekannt. Stattdessen müssen sich die Biohacker mit einer verbreiteten Gentechnikskepsis eines Großteils der Gesellschaft auseinandersetzen, zumindest was die nichtmedizinische Nutzung von GVO außerhalb geschlossener Produktionsanlagen anbelangt. Biohacker müssen sich daher nicht nur an die strengeren rechtlichen Vorgaben halten (was für die meisten einen Verzicht auf gentechnische Arbeiten bedeutet), sondern sehen sich auch einem stärkeren Rechtfertigungsdruck als in den USA ausgesetzt.

**KASTEN VI.4: BIOLOGISCHE SICHERHEITSSTUFEN UND GENTECHNIKLABORE**

Die biologische Schutzstufe (»biosafety level« [BSL]) ist eine Gefährlichkeitseinstufung biologischer Arbeitsstoffe. Diese wird durch die Richtlinie 2000/54/EG über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe bei der Arbeit für die Europäische Union normiert und in der Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit Biologischen Arbeitsstoffen (Biostoffverordnung – BioStoffV) in Deutschland eingeführt. Eine vergleichbare Einteilung wird auch von Centers for Disease Control and Prevention in den USA verwendet. Die Risikogruppe 1 beschreibt Biostoffe, bei denen es unwahrscheinlich ist, dass sie beim Menschen eine Krankheit hervorrufen. Risikogruppe 2 beschreibt Biostoffe, die eine Krankheit beim Menschen hervorrufen können und eine Gefahr für Beschäftigte darstellen könnten. Eine Verbreitung in der Bevölkerung ist dagegen unwahrscheinlich, und eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung ist normalerweise möglich. Risikogruppe 3 umfasst Biostoffe, die eine schwere Krankheit beim Menschen hervorrufen und eine ernste Gefahr für Beschäftigte darstellen können; die Gefahr einer Verbreitung in der Bevölkerung kann bestehen, doch ist normalerweise eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung möglich. Risikogruppe 4 kategorisiert Biostoffe, die eine schwere Krankheit beim Menschen hervorrufen und eine ernste Gefahr für Beschäftigte darstellen. Die Gefahr einer Verbreitung in der Bevölkerung ist unter Umständen groß und eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung ist normalerweise nicht möglich.

Die BioStoffV ordnet den vier Risikogruppen von Biostoffen vier Schutzstufen zu. Die Einstufung erfolgt nach dem Infektionsrisiko; vereinfacht bedeutet dies, je gefährlicher ein Biostoff ist, desto höher ist die Risikogruppe. Laboratorien, in denen mit biologischen Arbeitsstoffen umgegangen wird, müssen bestimmte Schutzmaßnahmen treffen. Die Schutzstufen bauen aufeinander auf, sodass die Regelungen der niedrigeren Schutzstufen auch für die höheren Stufen gelten. Für Laboratorien, in welchen mit gentechnisch veränderten Organismen gearbeitet wird, gilt nach

187 http://radar.oreilly.com/2012/12/darpa-big-data-military-open-source-agile.html

dem Gentechnikgesetz (GenTG) und der Verordnung über die Sicherheitsstufen und Sicherheitsmaßnahmen bei gentechnischen Arbeiten in gentechnischen Anlagen (Gentechnik-Sicherheitsverordnung – GenTSV) eine ähnliche Einstufung in vier biologische Sicherheitsstufen, die im Laborjargon als S-1-Labor bis S-4-Labor bezeichnet werden. In Laboratorien der Schutzstufe 1 sind allgemeine Hygienemaßnahmen einzuhalten, Laborausstattung mit spezieller Kennzeichnung zu verwenden und bundeslandabhängig spezielle bauliche und apparative Ausstattungen gefordert. Schutzstufe 2 erfordert eine räumliche Festlegung, Kennzeichnung und Zugangskontrolle der Arbeitsräume. Für Biostoffe der Risikogruppe 3 oder 4 ist der Zugang auf fachkundige und zuverlässige Beschäftigte zu beschränken. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Vorschriften zur Arbeitssicherheit. So muss zum Beispiel laut BioStoffV die Abluft gefiltert werden und es bestehen strenge Regeln für Materialien (z. B. Abfall), die das Labor verlassen müssen. Zusätzlich zu dem Anlagenbetreiber eines gentechnischen Labors jeder Sicherheitsstufe benötigt man so auch einen Sicherheitsbeauftragten, der Anlage und Betrieb überwachen muss. Anlagenbetreiber und Sicherheitsbeauftragter benötigen umfangreiche Qualifikationen, um als solche arbeiten zu dürfen, darunter ein abgeschlossenes Biologiestudium auf Master- oder Diplomniveau, einen Sachkundenachweis und dazu noch drei Jahre Berufserfahrung mit molekularbiologischem Bezug. Zu den personellen Voraussetzungen kommen kostspielige Anforderungen an die Bauart einer gentechnischen Anlage und eine zehnjährige Dokumentationspflicht aller Tätigkeiten. Selbst gentechnische Arbeiten der niedrigsten Sicherheitsstufe durchzuführen, ist für Einzelpersonen de facto legal nicht möglich.

Ein Verweis auf das persönliche Interesse, eine diffuse Hoffnung auf eine spätere kommerzielle Nutzbarkeit, die künstlerische Freiheit oder einfach nur die Freude am Experimentieren reichen in Deutschland nicht aus, um DIY-Biologen auch bei als harmlos erachteten Arbeiten von den strengen Auflagen zu befreien. Andererseits gelingt es ihnen – im Zuge eines allgemeinen Trends der Aufwertung von Citizen Science und von »Makerkulturen« – immer öfter zu begründen, warum ihr Engagement gesellschaftlich nützlich ist und welche Beiträge sie möglicherweise zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise beisteuern können. In Kapitel VI.6. wird die Frage vertieft, wie sich die DIY-Biologie in einer für alle Beteiligten akzeptablen Weise besser regulieren ließe.

Eine weiter führende gesellschaftliche Auseinandersetzung mit der DIY-Bioszene findet derzeit im Rahmen des von der EU geförderten Projekts »SYNENERGENE« statt, das den Dialog zwischen verschiedenen internationalen staatlichen und zivilgesellschaftlichen Stakeholdern über die Möglichkeiten der Synthetischen Biologie fördert und deren Zukunftspotenziale auslotet. Ziel ist es, eine europäische Governancestrategie im Sinne des RRI-Programms der EU-Kommission zu formulieren (EC 2013; mehr zum Thema in Kap. V.2.6).

# Phase IV: Weitere Entwicklung der Szene – zwischen Kommerzialisierung und Open Source 5.

## Bisherige Start-ups und aktuelle Tendenzen 5.1

Auf die Gründerzeit der Hackerspaces folgte eine zunehmende Professionalisierung der DIY-Bioszene. In den meisten Fällen wird die DIY-Biologie zwar noch als Hobby betrieben oder von Künstlern für ihre Projekte aufgegriffen. Durch den Erfolg der Szene traten den Hackerspaces aber mehr und mehr professionelle Ingenieure, Unternehmer und Wissenschaftler bei, während die Studenten und Amateure, die von Beginn an involviert waren, selbst dazugelernt hatten. In der Folge gibt es zunehmend Akteure, deren Motive, DIY-Biologie zu betreiben, kommerzieller Art sind und die aus Hackerspaces heraus Start-up-Firmen gründen. In der Vergangenheit waren einige Projekte erfolgreich, die billige und einfache Laborgeräte und Analysekits zum Beispiel für Entwicklungsländer entwickeln (Engelhard/Hagen 2012, S. 35).

Viele der kommerziellen Biohacker sehen sich in der Tradition der Garagenentwickler aus der Anfangsphase der Computerindustrie in den 1980er Jahren und haben es sich zum Ziel gesetzt, auf unkonventionelle Weise neue Impulse und Ideen in die biotechnologische Forschung einzubringen. Sie wollen mithilfe biotechnologischer Methoden Anwendungen entwickeln, die von den akademischen oder industriellen Forschungsakteuren nicht intensiv verfolgt werden. Projekte zielen beispielsweise auf medizinische Point-of-Care-Diagnostik (d. h. ortsungebunden, individuell, patientenspezifisch) oder die dezentrale Überprüfung von Nahrungsmittelqualität. Dabei profitieren die Unternehmer vom freien Ideen- und Informationsaustausch, der in der Open-Source-Kultur der DIY-Bioszene gepflegt wird. Bisher gibt es einige Dutzend Start-ups weltweit.

Das erste kommerziell erfolgreiche Projekt war das OpenPCR-Gerät des BioCurious-Mitbegründers Tito Jankowski (Kap. VI.4.1). Mit seinem Kollegen Josh Perfetto entwickelte er 2010 ein Gerät (auch Thermocycler genannt), mit dem man DNA durch die sogenannte Polymerasekettenreaktion (»polymerase chain reaction« [PCR]) kopieren, analysieren und verändern kann. Das Patent für die Erfindung der PCR stammt aus dem Jahr 1986 und war kurz zuvor ausgelaufen. Die PCR stellt seit ihrer Erfindung eine zentrale Methode der Gentechnik in allen Biologielaboren dar. Das OpenPCR-Gerät ist mit 599 US-Dollar konkurrenzlos billig; mittlerweile wurden mehr als 400 Einheiten verkauft, viele davon an Schulen. Die Konstruktionsdaten, Softwarecodes und Anwendungsprotokolle stehen als Open-Source-Projekt offen zur Verfügung und sind auf der Firmenwebsite unter einer offenen Lizenz herunterladbar.[188]

Das kanadisches Start-up Synbiota, Inc., das von Wagniskapitalinvestoren unterstützt wird, betreibt ein Webportal für Synthetische Biologie, auf dem man Projekte konzipieren, verwalten, dokumentieren und präsentieren kann. Darunter gibt es auch Open-Source-Werkzeuge für genetisches Design von Plasmiden. Der Service richtet sich gezielt an die DIY-Bioszene, aber auch an andere interessierte Wissenschaftler und Ingenieure. Die Grundfunktionen sind kostenlos, durch Abonnements kann man sich zusätzliche Funktionen und Tools freischalten lassen. Durch die Plattform sollen explizit dezentrale und kollaborative Open-Source- und Crowdsourceprojekte ermöglicht

188 http://openpcr.org (30.11.2015)

werden.[189] Synbiota ist Partner des irischen Start-up-Accelerators IndieBio. IndieBio ist wiederum weltweit der erste Start-up-Accelerator im Bereich der Synthetischen Biologie und fördert Unternehmensgründer. Bisher wurden nach eigenen Angaben mehr als 3 Mio. Euro Förderung direkt vergeben oder von Partnern eingeworben.[190] Eines der geförderten Projekte ist das von Briefcase Biotec 2014 entwickelte »Kilobaser« (Kap. VI.4.1). Ziel ist es, DNA-Synthese zu miniaturisieren und zu dezentralisieren und dafür eine Art Desktop-DNA-Drucker zu entwickeln. Bisher haben Wagniskapitalgeber deutlich mehr als 500.000 Euro in das Projekt investiert. Durch den Druck der Geldgeber wird das Projekt nicht mehr als Open-Source-Entwicklung durchgeführt, sondern soll stattdessen zu einem patentierten Produkt führen.[191]

Ein besonders PR-trächtiges, in vieler Hinsicht fragwürdiges Projekt, das der DIY-Bioszene zugeordnet wird, ist das Glowing-Plant-Projekt[192] (Kap. IV.1.3). Es konnte durch eine Crowdfundingaktion auf der Website »Kickstarter.com« rund 1 Mio. US-Dollar einnehmen, mit dem Versprechen, Samen von selbstleuchtenden transgenen Pflanzen zu verschicken. Das Team nutzte zwar die Ressourcen des Biohackerspace BioCurious und holte sich gezielt Wissen in der DIY-Bioszene. Die Kickstarterkampagne wurde aber de facto von professionellen Unternehmern, die jeweils eigene Firmen betreiben, lanciert und von versierten PR-Strategen und Venturekapitalgebern im Umfeld der US-amerikanischen Synbio-Branche beraten. Als die Kampagne gestartet wurde, gab es weder ein Produkt noch eine konkrete Idee, wie und ob man das Vorhaben technisch umsetzen könnte. Erst im Nachhinein wurden von externen Wissenschaftlern das benötigte Know-how und Materialien eingekauft. Die prinzipielle Möglichkeit, eine sichtbar leuchtende Pflanze herzustellen, wird von Experten allerdings stark angezweifelt. Das Projekt erscheint in erster Linie als eine erfolgreiche PR-Kampagne einiger Firmen im Bereich der Synthetischen Biologie, darunter das von Wagniskapitalgebern im Silicon Valley mit über 10 Mio. US-Dollar geförderte Unternehmen Cambrian Genomics, das vor allem eine DNA-Laserdrucktechnologie entwickeln wollte (Sullivan 2014).

Als ein weiteres Projekt kündigte Cambrian Genomics an, transgene vaginale Mikroorganismen herstellen zu wollen, die nach Pfirsich riechen sollen, und sprach auch in diesem Kontext wieder von Biohacking. Damit löste die Firma wie schon beim Glowing-Plant-Projekt (ETC Group/Friends of the Earth 2013) heftige ablehnende Reaktionen in der DIY-Bioszene und von gentechnikkritischen NRO aus (Tiku 2014).

Dass Cambrian Genomics überhaupt hoffen konnte, mit derartigen Projekten auf positive Resonanz zu stoßen, illustriert ein weiteres Mal die grundsätzlich andersartige Situation in den USA gegenüber Europa und speziell Deutschland. Nicht nur sind die regulativen Spielräume für eine Gentechnologieanwendung größer, sondern auch die Technologieoffenheit in der Gesellschaft (was nicht heißt, dass es nicht auch eine lautstarke Gentechnikkritik gäbe – diese ist allerdings nicht in gleicher Form mehrheitsfähig und sozioökonomisch relevant).

Im Silicon Valley (bzw. den USA insgesamt) gibt es anscheinend genügend Wagniskapitalgeber, die auch sehr vage Projektideen mit größeren Summen fördern – ein Umstand, der in der Innovati-

189 https://synbiota.com (30.11.2015)
190 https://synbiota.com/indiebio (30.11.2015)
191 http://kilobaser.com (30.11.2015)
192 https://www.kickstarter.com/projects/antonyevans/glowing-plants-natural-lighting-with-no-electricit (30.11.2015)

onsdebatte sehr regelmäßig als Standortvorteil gerade gegenüber dem in dieser Hinsicht konservativen Deutschland herausgestellt wird. Dass dabei auch viel Geld verloren geht und zum Teil fragwürdige Vorhaben gefördert werden, wird vielleicht häufig übersehen.

Start-ups wie Cambrian Genomics nutzen gezielt das tendenziell positive öffentliche Image der Biohacker, das Emanzipationsnarrativ und das Szenevokabular für sich aus – und gefährden dieses durch ihr sogenanntes »hackwashing«. Für die Biohacker ist die Situation damit sehr zwiespältig. Einerseits werden durch Start-ups und Venturekapital dringend benötigte Arbeitsplätze generiert, andererseits werden die langsam gewachsenen Formen der offenen und vertrauensvollen Zusammenarbeit durch das Eindringen kommerzieller Interessen belastet und letztlich infrage gestellt.

Falls sich die technischen Möglichkeiten der DNA-Synthese und Genmanipulation, beispielsweise auch durch die weitere Vereinfachung der Genome-Editing-Verfahren (Kap. IV.1.2), in Zukunft so schnell weiterentwickeln, wie es von vielen Beobachtern angenommen wird, dürften sich die Handlungsmöglichkeiten gerade einer zunehmend professionalisierten und kommerzialisierten DIY-Bioszene massiv ausdehnen. Eine dynamische Entwicklung wie in den späten 1980er Jahren in der Personalcomputerentwicklung wäre dann nicht auszuschließen – und würde wesentliche Fragen zur Sicherheit der Technologie, zum Umgang mit dem geistigen Eigentum und der gesellschaftlichen Verantwortung insgesamt aufwerfen (Kap. VI.6).

Mit den Zielen und Eigenarten der bisherigen DIY-Bioszene, die auf offener und gemeinsamer Kooperation jenseits der etablierten wissenschaftlichen und ökonomischen Strukturen und Verfahren beruht, werden die professionellen Start-ups – vielleicht abgesehen vom Habitus und der äußeren Erscheinung der Akteure, ähnlich wie in Teilen der Computer- und Internetbranchen – vermutlich nicht mehr viel gemein haben. Erfolgreiche Klein(st)unternehmen werden voraussichtlich wie in der Vergangenheit je nach Betätigungsfeld von größeren Playern, u. a. der Arzneimittel-, Ernährungs- oder Chemiewirtschaft, übernommen werden.

## Herausforderungen des Open-Source-Ansatzes der DIY-Biologie 5.2

Für die nichtkommerzialisierte DIY-Biologie wird sich gerade dann, wenn die Technologien leistungsfähiger, billiger und leichter zugänglich werden, neben der Biosicherheitsproblematik insbesondere die Frage stellen, wer von künftigen Ergebnissen profitieren wird: Wie kann erreicht werden, dass die Informationen, Erkenntnisse und Produkte so gestaltet werden können, dass sie von möglichst vielen Menschen für gesellschaftlich wünschenswerte/sinnvolle Zwecke genutzt werden können – und nicht über kurz oder lang Einzelinteressen dominieren und Machtansammlungen befördert werden? Dieses Kapitel beschreibt hierzu einige Voraussetzungen und bisherige Aktivitäten, weitergehende Überlegungen werden in Kapitel VI.6. vorgestellt.

### PROBLEME DES PATENTSCHUTZES IN DEN BIOWISSENSCHAFTEN

Gemeingüter (auch Allmende genannt [»commons«]) sind abstrakte oder physische Dinge, die jeder nutzen kann. Sie sind »frei«, wenn sie ohne Erlaubnis nutzbar sind oder eine Erlaubnis neutral vergeben wird. Dies sind beispielsweise Luft zum Atmen oder öffentlich zugängliches Wissen wie klassische Literatur. »Open Access« bedeutet in diesem Zusammenhang unbegrenzter Zugriff auf

das Gemeingut. Das Konzept der »Open Source« fordert darüber hinaus auch eine Offenlegung und Nutzungsfreigabe der zugrundeliegenden Rohmaterialien oder -daten – in der Informationstechnologie den Quellcode der Software bzw. bei Hardwareprojekten die Konstruktionspläne.

Da die Bereitstellung von Gütern Kosten verursacht, sind die Marktteilnehmer zu wirtschaftlichem Handeln gezwungen. Erfindungen gelten als geistiges Eigentum, ähnlich wie künstlerische Werke. Das Urheberrecht sichert Erfindern und Kunstschaffenden exklusive Nutzungsrechte in Form von Patenten bzw. des Copyrights, nicht zuletzt um den Aufwand beim Erfinden zu kompensieren und Entwicklungsanreize zu schaffen.

Quelle der Erfindungs- und Forschungsaktivität ist gleichzeitig der freie, nicht gewinnorientierte Austausch von Informationen und Materialien in der Wissenschaft (also Open Access) – wobei freier Zugang zu Informationen nicht gleichbedeutend mit der Abwesenheit von geistigen Eigentumsansprüchen ist. Die Schutzrechte sollen gerade im Bereich von Wissenschaft und Forschung gewährleisten, dass der jeweils erreichte neueste Erkenntnisstand für die Weiterentwicklung genutzt werden kann – anstelle einer Geheimhaltung zur Erlangung von potenziellen Wettbewerbsvorteilen.

Sowohl die Quellcodes der Informationstechnologie als auch viele Ergebnisse biowissenschaftlicher Forschung (z. B. in Form von DNA-Sequenzen) werden von den klassischen Stoff- und Verfahrenspatenten jedoch nicht angemessen abgedeckt. Für den Schutz bio(techno)logischer Entwicklungen bzw. Erfindungen wurde in Europa ein spezielles Biopatentrecht entwickelt, das 1998 in die Verabschiedung der Richtlinie 98/44/EG über den rechtlichen Schutz biotechnologischer Erfindungen (Biopatenrichtlinie) gemündet ist. Allerdings gibt es anhaltende Auseinandersetzungen über Anwendbarkeit, Gültigkeit und Reichweite der Schutzbestimmungen, deren ausführliche Darstellung den Rahmen des vorliegenden Berichts sprengen würde. Eine besondere Bekanntheit haben beispielsweise die langjährigen Auseinandersetzungen über die Patentierbarkeit menschlicher Gensequenzen (als Grundlage für den BRCA-Test auf Brustkrebsrisiko) oder von Individuen gewonnener und dann veränderter Zelllinien sowie über die Anwendbarkeit des Patentrechts grundsätzlich im Bereich der Tier- und Pflanzenzüchtung (in denen andere Rechtssysteme etabliert waren) erlangt. In Deutschland wurde von der Bundesregierung eigens ein Biopatentmonitoring eingerichtet, um unzulässige bzw. fragwürdige Biopatente bei Nutzpflanzen und Nutztieren zu erfassen und zu bewerten. Im jüngsten Bericht heißt es (Bundesregierung 2014, S. 3): »Der Biopatentrichtlinie ist nicht eindeutig zu entnehmen, ob auch Pflanzen und Tiere, die ausschließlich durch ›im Wesentlichen biologische Verfahren‹ gewonnen wurden, als Erzeugnisse ebenfalls von der Patentierung ausgenommen sind.«

Grundsätzlich hat die deutsche Forschungspolitik seit den 1990er Jahren gezielt und mit großem Engagement die Kommerzialisierung öffentlicher Forschung im Allgemeinen und der Biotechnologie im Besonderen gefördert. An den Universitäten, bei den großen Forschungseinrichtungen, wie MPG oder Helmholtz-Gemeinschaft, wurden spezielle (Patent-)Verwertungsagenturen etabliert, die systematisch die Verwertbarkeit der Ergebnisse wissenschaftlicher Arbeit prüfen und die Forschenden bzw. deren Institute bei der Patentierung und kommerziellen Umsetzung über Lizenzverträge oder auch direkte Ausgründungen unterstützen. Patente sind zudem für Wissenschaftsorganisationen und akademische Institutionen ein Evaluationskriterium für die Leistung von Forschungsprogrammen, Instituten und einzelnen Wissenschaftlern geworden. Gleichzeitig deuten empirische Untersuchungen darauf hin, dass Patentrechte z. B. in der Biomedizin, der Humangenomforschung oder in der Biotechnologie (Folge-)Forschung und Innovation explizit behindern können (Ga-

lasso/Schankerman 2014; Murray/Stern 2007; Williams 2013). Ähnlich wie in der Informationstechnologie haben sich beispielsweise in der gentechnisch basierten Pflanzenzucht oder bei Biopharmaka mittlerweile kaum noch durchschaubare Ansammlungen von Urheber- bzw. Nutzungsrechten gebildet, sogenannte Patentdickichte (Galasso/ Schankerman 2014). Zusammen mit hohen Preisen für die Anmeldung und juristischer Durchsetzung der Rechte kann dies tendenziell zu einem Marktversagen in Form einer zunehmenden Zentralisierung bei wenigen große Firmen führen (beispielsweise in der globalen Saatgutindustrie, bei der die TOP 3 über 50 % und die TOP 10 über 75 % Marktanteil aufweisen; ETC Group 2013a, S. 6). Dies kann sich darüber hinaus auf die akademische Wissenschaft nachteilig auswirken, wenn patentgeschützte Verfahren aus Kosten- oder Rechtsunsicherheitsgründen nicht genutzt werden können (Galasso/Schankerman 2014; Murray/Stern 2007). Ein aktuelles Beispiel für die Brisanz der Patentrechtsfragen ist der Streit um die CRISPR/Cas-Technologie (Kupecz 2014).

Diese Situation einer oftmals großen Anzahl an Rechteinhabern mit unklaren und teils widersprüchlichen Ansprüchen kann durch Nichtoffenlegung von Wissen und Patenthortung letztlich zur Tragik der Antiallmende (»tragedy of the anticommons«)[193] führen, der zufolge die Vielzahl an Rechteinhabern das Erreichen eines sozial erwünschten Resultats unmöglich macht (für den Bereich der Biomedizin: Heller/Eisenberg 1998). Ein Ansatz, durch den internationale Regierungsorganisationen, Industrie und manche Universitäten versuchen, dieses Problem zu lösen, sind Patentpools, in denen die Partner sich Erfindungen gegenseitig und »gebündelt« lizenzieren (Zimmeren et al. 2011).

## BISHERIGE OPEN-SOURCE-INITIATIVEN

Neben der beschriebenen Tendenz zur Patentierung und Kommerzialisierung biowissenschaftlicher Ergebnisse sind aber gerade durch die quantitativen, d. h. auf die Produktion großer Datenmengen ausgerichteten Projekte der Genom- und Proteomforschung große Datenbanken entstanden, die aufgrund der öffentlichen Finanzierung der Forschungsvorhaben und zur Gewährleistung eines schnellen Erkenntnisfortschritts öffentlich zugänglich und in vielen Fällen auch unentgeltlich nutzbar sind (Kasten VI.5).

Diese Datenbanken wachsen aufgrund der immer leistungsfähigeren DNA-Sequenzierungs- und anderen Analysetechnologien exponentiell, außerdem werden die verschiedenen Datenbanken und Informationen zunehmend vernetzt. Dazu gehören biochemische Stoffwechselvarianten, Expressionsmuster von Proteinen, 3-D-Strukturinformationen zu Zellkomponenten, aber auch Daten über ökologische Zusammenhänge. Die größte Datenbank ist zurzeit GenBank aus den USA. Die größte europäische Datenbank ist EMBL-EBI, die jedoch nur etwa ein Zehntel des Umfangs der GenBank aufweist.

### KASTEN VI.5: BIOLOGISCHE DATENBANKEN UND DEREN NUTZUNGSBEDINGUNGEN

Public Domain bzw. CC0-Lizenzen (Kasten VI.6): Informationen dürfen von jedermann zu jedem Zweck frei verwendet werden.

193 https://de.wikipedia.org/wiki/Tragik_der_Anti-Allmende (30.11.2015)

> *GenBank* ist eine Plattform für Nukleotid- und Proteinsequenzen sowie andere biologische Daten und wird vom US-amerikanischen National Center for Biotechnology Information (NCBI)[194] betrieben.
> *EMBL-EBI* (The European Bioinformatics Institute)[195] ist Teil des European Molecular Biology Laboratory und umfasst Nukleotidsequenzen, Proteinstrukturen, Expressionsprofile sowie Daten zu ganzen Zellen und Organismen.
> Die *Protein Data Bank* (PDB)[196] wird verantwortet durch die Research Collaboratory for Structural Bioinformatics (RCSB), unterstützt von der National Science Foundation, den National Institutes of Health und dem U.S. Department of Energy, ist eine Datenbank für 3-D-Strukturdaten von Proteinen und Nukleinsäuren.
> Das 3-*Million Genomes Project* wurde 2011 vom Beijing Genomics Institute (BGI)[197] in China ins Leben gerufen und sieht vor, jeweils 1 Mio. Genome von Menschen, von Pflanzen und Tieren und von Mikroorganismen zu entschlüsseln.

Kommerzielle Datenbanken: Lizenzerwerb vor Nutzung notwendig, z. T. für Forschungszwecke freigegeben

> *Genome Online Database* (GOLD)[198] wird vom U.S. Department of Energy Joint Genome Institute betrieben. Das Institut kooperiert mit US-amerikanischen Unternehmen und wird durch diese zum Teil finanziert.
> *Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes* (KEGG)[199], Japan, ist eine Sammlung von Onlinedatenbanken, die genomische, enzymatische, Enzym- und Signalpathways und biologische Chemikaliendaten enthalten. Der Service kann seit 2011 aus Geldmangel nicht mehr kostenlos angeboten werden.

Viele Biohacker setzen sich für die maximale Zugänglichkeit und Nutzbarkeit aller biowissenschaftlicher Erkenntnisse als Public Domain ein und verweisen auf die positiven Erfahrungen mit der Open-Source-Kultur der Computerszene. Im Informationsbereich habe der Verzicht auf abwehrende Schutzrechte seit den 1990er Jahren die Entwicklung der Technologie durch den vereinfachten Austausch von Computercodes enorm beschleunigt. Die Computerhacker richteten sich dazu auf Copyright basierende Lizenzen (Creative Commons; Kasten VI.6) ein (Lerner/Tirole 2005). Ein derartiges Open-Source-Lizenzmodell ermöglicht es einer großen, dezentral organisierten Gemeinschaft von Programmierern, gemeinsam langwierige und komplexe Projekte zu bearbeiten. Als besonders prominente Erfolge werden häufig Wikipedia und das Betriebssystem Linux angeführt. Letztlich haben Open-Source-Codes, aber auch den Aufstieg von Google ermöglicht. Die Firma stellt ihre eigenen Entwicklungen weiterhin unter offenen Lizenzen zur Verfügung (so z. B. das Smartphonebetriebssystem Android).[200]

194 www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/ (30.11.2015)
195 www.ebi.ac.uk (30.11.2015)
196 www.rcsb.org/pdb/home/home.do (30.11.2015)
197 www.nationalgenebank.org/en/research.html (30.11.2015)
198 https://gold.jgi.doe.gov/ (30.11.2015)
199 www.kegg.jp/ (30.11.2015)
200 https://developers.google.com/open-source/projects (30.11.2015)

Während einige ökonomisch erfolgreiche Projekte der Informationsindustrie also auf Kollaboration unter den Bedingungen des Copyright bzw. Urheberrechts gründen, basiert das Geschäftsmodell in der Biotechnologie hauptsächlich auf Patenten.

**KASTEN VI.6: CREATIVE-COMMONS- ODER CC-LIZENZEN**

Durch CC-Lizenzen geben die Inhaber von Urheber- und Leistungsschutzrechten allen Interessierten zusätzliche Freiheiten. Das bedeutet, dass jeder mit einem CC-lizenzierten Inhalt mehr machen darf als das Urheberrechtsgesetz ohnehin schon erlaubt. CC-Lizenzen erzeugen Materialpools, aus dem nicht nur entnommen, sondern auch auf freiwilliger Basis etwas hineingegeben wird. In vielen Communities ist es inzwischen eine Selbstverständlichkeit, sich offener Lizenzmodelle zu bedienen, statt sich alle Rechte strikt vorzubehalten. Ohne freie Lizenzierung muss für jede Verwendung erstmal beim Urheber nachgefragt werden. Da dies den Aufwand für andere erhöht, werden Inhalte ohne Freiheiten oft entweder gar nicht oder ohne Erlaubnis genutzt, was beides nicht im Sinne der Urheber ist. Eine – wenn auch vielleicht eingeschränkte – Freigabe der eigenen Inhalte unterstützt die gegenseitige Vermehrung und Erhaltung des gemeinsamen Materialpools. Auch kommerzielle Erwägungen können für eine CC-Lizenzierung sprechen: Innovative kleine Unternehmen sind auf rasche Verbreitung ihrer Inhalte angewiesen, erreichen diese aber gerade mangels Bekanntheit nur schwer und bleiben dadurch auch unbekannt. Eine Veröffentlichung unter einer freien Lizenz führt oft zu einer spürbar größeren Verbreitung der Inhalte, da die potenziellen Nutzer frei zugreifen dürfen und über bestimmte Plattformen und Suchmaschinen bereits heute gezielt nach frei lizenzierten Inhalten gesucht werden kann. Durch sogenannte Share-alike-Klauseln kann darüber hinaus verbindlich eingefordert werden, dass alle aufbauenden Entwicklungen unter denselben Bedingungen geteilt werden müssen. So können beispielsweise auch nur ausschließlich nichtkommerzielle Verwendungen zugelassen werden.

Quelle: nach http://de.creativecommons.org/was-ist-cc/ (30.11.2015)

Die australische Initiative Cambia hat schon vor mehr als 20 Jahren versucht, ein Biological-Open-Source-System (BiOS) aufzubauen. Dessen Ziel bestand darin, die aus der Informationstechnologie stammende Idee der freien Software auf biologische Innovationen zu übertragen. Richard Jefferson (2006), Gründer von Cambia (Kap. VI.5.3) begründete dieses Ziel folgerndermaßen: »Extraordinary efficiencies occur when the tools of innovation are shared, are dynamically enhanced, have increased levels of confidence (legal and otherwise) associated with their use, and are low or no-cost.« Um dies zu erreichen, sollten neue Technologien im Rahmen von BiOS zwar weiterhin patentiert, im Anschluss daran jedoch unter eine spezielle BiOS-Lizenz genommen werden. Dies sollte die kostenfreie Verfügbarkeit sicherstellen. Zielgruppe waren in erster Linie Wissenschaftler. Die Anmeldung von Patenten ist allerdings aufwendig und kostenintensiv (was für einzelne Wissenschaftler, z. B. in der DIY-Bioszene, kaum finanzierbar ist). Eine Freigabe patentgeschützter Technologien unter offenen Lizenzen, wie von BiOS vorgeschlagen wurde, ist daher wenig attraktiv. Jefferson hat die BiOS-Idee daher wegen mangelnder Nachfrage mittlerweile aufgegeben und konzentriert sich auf die Beobachtung und Dokumentation von Patentierungen (Bundschuh 2012).

Der Open-Source-Gedanke hatte von Anfang an eine programmatische Bedeutung bei der Entwicklung der Synbio, insbesondere beim iGEM-Wettbewerb (Kap. II.2.2) und den Aktivitäten der BioBricks Foundation (BBF)[201] sowie zahlreichen weiteren Initiativen, die Genmaterial mit Kollegen frei teilen möchten, beispielsweise der Toolbox des BIOSS Centre for Biological Signalling Studies der Universität Freiburg.[202] Die BBF, die auch als Biobank für die Ergebnisse der iGEM-Teams fungiert, wurde 2003 von Wissenschaftlern und Ingenieuren als Non-Profit-Organisation gegründet. Sie setzt sich dafür ein, dass die Synbio dem öffentlichen Interesse dient. Die BBF hat sich mit einem eigenen Standard, dem »BioBrick™ Public Agreement« (BPA), in die Diskussion um geistige Eigentumsrechte im Bereich der Biotechnologien eingebracht.[203] »BPA is a free-to-use legal tool that allows individuals, companies, and institutions to make their standardized biological parts free for others to use. … The BioBrick™ Public Agreement was developed for sharing the uses of standardized genetically encoded functions (e.g., BioBrick™ parts) but, in practice, can be used to make free the sharing of any genetically encoded function that you might already own or make anew.«

Die Gründung der BBF erfolgte erklärtermaßen mit dem Ziel, eine sich selbst verstärkende Entwicklung in der Synbio in Gang zu setzen, wie man sie in vielen Projekten der Open-Source-Community bei der Softwareentwicklung beobachten konnte. Ein zentrales Ziel war die Standardisierung und Qualitätsüberprüfung der »Biobausteine«, also molekulargenetischer Funktionseinheiten für bestimmte Zellfunktionen, die als zukünftige Gestaltungselemente synthetischer Organismen dienen sollten. Durch den offenen Zugang sollte eine dynamische Open-Source-Community aufgebaut werden, um eine schnelle und effektive Entwicklung der Synbio-Technologie als Allgemeingut zu ermöglichen (Bennett 2011). Das Biobrickskonzept hat sich allerdings noch nicht als ausreichend tragfähig erwiesen. Einerseits war es in den meisten Fällen nicht möglich, die Standardisierung und Funktionalität der Biobricks zu gewährleisten, andererseits gibt es eine bestehende rechtliche Unsicherheit in Bezug auf Patentansprüche Dritter aufgrund der angebotenen Biobricks. Die im Rahmen des iGEM-Wettbewerbs entwickelten Biobricks, die einen Großteil des verfügbaren Bestands der BBF ausmachen, sind zumeist auch nur unzureichend getestet. Diese Probleme sind vermutlich nicht zufällig für ein System, das ohne richtig große öffentliche oder private Förderung mit relativ begrenztem Mittel- und Zeiteinsatz möglichst viele Teilnehmer erfassen möchte. Der Erfolg zukünftiger Open-Source-Projekte der DIY-Biologie hängt somit im Wesentlichen davon ab, ob es gelingt, funktionale, wiederverwertbare Biomaterialien (z. B. Standardorganismen und Gensysteme) zu etablieren und generell verfügbar zu machen. (Kap. VI.6).

## Phase V: Zukunftsszenarien 6.

*»Wenn es nicht wahr ist, ist es doch gut erfunden.« Giordano Bruno (1585)*

In diesem Kapitel werden einige gesellschaftliche und politische Visionen von Vertretern der DIY-Bioszene in Bezug auf die technologische Entwicklung der Lebenswissenschaften präsentiert. Die Darstellung beruht auf Aktivitäten und Diskussionen von Wissenschaftlern, Künstlern, Unterneh-

201 http://biobricks.org/ (30.11.2015)
202 www.bioss.uni-freiburg.de/cms/toolbox-home.html (30.11.2015)
203 https://biobricks.org/bpa (30.11.2015)

mern und Hackern der europäischen und asiatischen DIY-Bioszene im Rahmen des von ITAS koordinierten Projekts »SYNENERGENE« (Kap. V.2.7), die einige der in den letzten Jahren entstandenen Ideen gezielt weiterentwickelt und dabei in einen politischen Kontext gesetzt haben. Das Ziel war es, Szenarien für einen konstruktiven Umgang mit DIY-Biologie zu beschreiben, ohne mögliche Probleme im Bereich der biologischen Sicherheit oder der geistigen Eigentumsrechte auszublenden. Dabei werden zwei Zeitspannen unterschieden: mittelfristig, d. h. innerhalb der nächsten zehn Jahre, und langfristig, d. h. über zehn Jahre hinaus. Je weiter die Szenarien in die Zukunft reichen, desto spekulativer ist notwendigerweise ihr Charakter.

## Anwendungen 6.1

Bisher sind die Effektivität der eingesetzten Methoden, das Wissen über biologische Zusammenhänge sowie die Mächtigkeit der Theorien und Modelle der Synthetischen Biologie mit Blick auf die Fähigkeit, Organismen grundlegend zu verändern oder weitestgehend künstlich herzustellen, sehr begrenzt. Dies könnte sich aber mittelfristig schon deutlich ändern und damit auch den Aktionsradius von Biohackern maßgeblich erweitern – vor allem dann, wenn die Kosten für Laborequipment und Materialien weiter massiv fallen würden, insbesondere für die DNA-Synthese (was bei der DNA-Sequenzierung bereits geschehen ist). Allgemein geht der Trend in Richtung einer Dezentralisierung der Technologie und Vereinfachung der Anwendungen. Längerfristig wird dazu voraussichtlich die Miniaturisierung und Automatisierung nahezu aller Laborgeräte und -tätigkeiten hinzukommen. Durch Lab-on-a-Chip-Technologie werden biologische Reaktionen voraussichtlich in tragbaren Geräten computergesteuert ablaufen können. Mit fortschreitendem Wissen und ausgefeilteren Methoden wird die Technologie auch in zunehmendem Maße automatisiert funktionieren.

Voraussetzung für ein einfaches und verlässliches Herstellen transgener Organismen sind preiswerte und schnell verfügbare synthetische DNA, die Automation der molekularbiologischen Methoden und gut charakterisierte und standardisierte molekulare Werkzeuge und Organismen (Kapitel VI.5.2). Dies verspricht kürzere Iterationsschritte bei der Entwicklung immer komplexerer Produkte. Selbst wenn man annimmt, dass sich die theoretische Basis der Molekular- und Zellbiologie (im Sinn einer umfassenden Systembiologie) nicht grundsätzlich weiterentwickelt und Prognosemöglichkeiten auf Basis von Computermodellen für das »Verhalten« genetischer Konstrukte weiterhin nicht verlässlich sind, so dürfte dennoch die Zeit- und Kostenspanne zur Durchführung von Synbio-Experimenten dramatisch sinken und dadurch deren Erfolgswahrscheinlichkeit (auf der Basis automatisierter Trial-and-Error-Versuche) steigen.

Sind die technischen Grundlagen erst einmal etabliert, dann wird immer mehr (DIY-)Biologen die Option eröffnet, auch in kleineren Vorhaben komplexere gentechnische Arbeiten durchzuführen, um neue Produkte zu entwickeln und zu testen. Langfristig ist es denkbar, dass viele kleine Unternehmen gentechnische Produkte herstellen, analog zur Tätigkeit heutiger mittelständischer Softwareunternehmen. Mit etwas Fantasie kann man sich dezentral »programmierte« transgene Organismen für den Alltagseinsatz vorstellen, beispielsweise Bakterien, die Parfumstoffe produzieren (Bercovici 2014), verbesserte Joghurtbakterien zur Verdauungsförderung und Zahnhygiene oder veränderte Zierpflanzen und Haustiere (vgl. hierzu die »techno-moral vignettes« des Rathenau-Instituts; Kap. V.2.3). Erschwingliche, einfache und mit minimalen Ressourcen auskommende technische Lösungen für den Laborbereich können außerdem von großem Wert für medizinische Diagnostik und Forschung in Dritte-Welt-Ländern werden.

Ob dies tatsächlich in einem ähnlichen Umfang wie in der Start-up-Szene der Computerbranche geschieht, wird sich in den nächsten Jahren zeigen. Die im Nachhinein skurril anmutenden Fehleinschätzungen in Bezug auf die heute in praktisch allen Lebensbereichen präsenten leistungsfähigen Computer, wie sie noch in den 1980er Jahren von ausgewiesenen Experten formuliert wurden, legen nahe, die Möglichkeit einer zukünftigen weiten Verbreitung einer DIY-(Syn-)Biologie nicht von vornherein auszuschließen (Potthof 2013, S. 30).

Nimmt man an, dass sich Genanalyse- und -synthesetechniken quantitativ nur annäherungsweise ähnlich verbreiten werden wie Computer und Mobilfunkgeräte, dann würde langfristig eine im Vergleich zu heute noch einmal unvergleichlich größere Menge an biologischen Daten (darunter auch neue, »künstliche« Genomsequenzen) generiert und online in Datenbanken eingestellt werden. Die Auswertung und Anwendung dieser Informationsmassen würden dabei dann zweifellos wiederum mittels internetbasierter Technologien global und dezentral stattfinden. Durch die zu erwartende Dezentralisierung der DNA-Synthesetechnologien würde es auch überall möglich sein, transgene bzw. synthetische Organismen zu erzeugen. Neben der Nutzung von Synbio-Methoden in den Produktionsanlagen der industriellen Biotechnologie (Kap. III.1), deren Güter unter großem Energieaufwand rund um den Globus transportiert werden, könnten in Zukunft Produkte mit hoher Wertschöpfung mithilfe biotechnologischer Verfahren jeweils vor Ort hergestellt werden. Die dafür nötigen Gensequenzen – als zentrale Ressource – könnten digital (oder physisch in Form von haltbarer DNA per Post) übermittelt werden und vor Ort zum Einsatz kommen. Die Technologie bietet damit die Möglichkeit, ähnlich wie Software geteilt, bearbeitet und verwaltet zu werden, mit direkten materiellen Produkten als Resultat (ähnlich wie bei »konventionellen« additiven Fertigungsverfahren).

Praktisch bedeuten würde das, dass eine Wertschöpfung wie in der Pharmabranche, eine Bearbeitung der Produkte wie in der Digitalwirtschaft und eine Organisation sowie Produktion wie in der Landwirtschaft in einem einzigen Wirtschaftszweig vereint wären. Diese Vision beschreibt eine Variante einer zukünftigen Bioökonomie (Kap. III.6), bei der Biohacker bzw. Unternehmensgründungen aus deren Umfeld eine zentrale Rolle spielen würden, um die nötigen Informations- und Produktionsnetze aufzubauen und zu testen. Es liegt nahe, sich eine mit der Mobilfunktechnologie vergleichbare Verbreitung in Entwicklungs- und Schwellenländern vorzustellen. Basierend auf einer relativ einfach zu errichtenden Infrastruktur (d. h. dezentrale, miniaturisierte und automatisierter Labortechnologie zum Sequenzieren und Synthetisieren von DNA sowie zur digitalen Analyse von Biomaterialien), könnten einzelne Wissenschaftler dezentral, aber kooperativ an der Entwicklung synthetischer Konstrukte arbeiten. So könnte eine solche Entwicklung zu einer Angleichung der technologischen Kompetenzen von Entwicklungs-, Schwellen- und Industrieländern führen. Da eine solche dezentrale Synthetische Biologie i. e. S. ausgesprochen wirkmächtig werden könnte, wäre besondere Vorsicht geboten, um Missbrauch und Schäden an Mensch und Umwelt zu minimieren sowie den Nutzen zu maximieren. Daher ergeben sich komplexe Fragen zu Sicherheit, Recht und Gerechtigkeit bei der Nutzung der Technologie ebenso wie für das zugrundeliegende Wissen und dessen Anwendung als solches, die es in den nächsten Jahren zu beantworten gilt:

Wie soll in Zukunft die Ausbringung von selbstreplizierenden Organismen gesellschaftlich auch über Ländergrenzen hinweg legitimiert werden? Wie können dabei umweltpolitische Fragen und Maßnahmen zum Erhalt einer intakten Biosphäre angemessen berücksichtigt werden? Wie viel Freiheit kann man in Zukunft einzelnen Wissenschaftlern/DIY-Biologen geben, und ab wann bedarf es einer Legitimation durch Dritte (z. B. Behörden)? Wie könnte eine Kontrolle der Experimente in

einem globalen Kontext bei fortschreitender Dezentralisierung von Wissen und Technologie funktionieren? Wer kann und darf diese Kontrollfunktion ausüben, und nach welchen Kriterien wird über die Legitimität von Experimenten entschieden? Wie kann man illegitime Übergriffe von Behörden, insbesondere von Geheimdiensten, in die Privatangelegenheiten von Wissenschaftlern/DIY-Biologen politisch, rechtlich und technologisch eindämmen? Wie kann angesichts einer digitalen Totalüberwachung ein selbstbestimmter und verantwortungsvoller Umgang mit z. B. sensiblen Informationen aus Genomanalysen etabliert werden?

In den folgenden Kapiteln VI.6.2 und VI.6.3 werden Vorschläge zur Beantwortung einiger dieser Fragen vorgestellt.

## Infrastruktur und Sicherheit 6.2

Zukünftige biologische und sonstige Sicherheitsmaßnahmen könnten in Zeiten einer vollständig globalisierten und dezentralisierten Nutzungsweise ebenfalls nur global und dezentral funktionieren. Dafür müssten mittelfristig Mechanismen entwickelt werden, die in der Lage sind, die Aktivitäten der DIY-Bio- und Kunstszene, von Start-up-Unternehmen und Großindustrie sowie akademische Forschungstätigkeit gleichermaßen verlässlich zu erfassen und neutral zu evaluieren. Die bisherige Sicherheitsarchitektur in Bezug auf Gensynthese sieht beispielsweise vor, auf freiwilliger Selbstverpflichtungsbasis der Firmen die Besteller von Genen auf Glaubwürdigkeit und Professionalität zu überprüfen, bevor synthetisch hergestellte DNA ausgeliefert wird (Kap. IV.2.2). Dies führte in der Vergangenheit bereits in Einzelfällen zu Verwirrung und Fehleinschätzungen, wenn beispielsweise Künstler DNA für gentechnische Arbeiten bestellen wollten. Eine individuelle Prüfung der Käufer von DNA auf diese Art wäre nicht mehr zu bewerkstelligen, sobald die Gensynthese tatsächlich dezentralisiert ist, da dann die digitale Sequenzinformation ausreicht, um das jeweilige Gen selbst herzustellen. Eine gewollte oder ungewollte Ausbringung und Verbreitung transgener/synthetischer Organismen würde dadurch um ein Vielfaches einfacher und kaum noch kontrollierbarer sein.

Zu restriktive Regulierungs- bzw. Sicherheitsvorgaben könnten allerdings eine ähnliche Wirkung haben, wie man sie aus historischen Erfahrungen mit Prohibitionsgesetzen kennt. Durch unangemessene Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen, die z. B. als politisch-behördliche Reaktion aufgrund übertriebener Bedrohungsszenarien ausgeübt würden, könnten Künstler, Wissenschaftler und Biohacker nicht mehr frei arbeiten oder würden mit Ausübung ihrer Arbeit illegal handeln, was die Wahrscheinlichkeit von Fehlentwicklungen begünstigen und gleichzeitig positive Entwicklungen hemmen würde.

Praktisch gesehen liegt das meiste verfügbare Wissen über genetische Daten – also die zentrale Ressource für die Synbio – bereits jetzt in online abrufbaren Datenbanken vor. Hier bietet sich also ein guter Ansatzpunkt zur Verwaltung und Überprüfung, wer diese Daten abruft und wofür.

Um Sicherheitsproblemen vorzubeugen, erscheint es naheliegend, die digitale Planung der Verwendung sicherheitsrelevanter Sequenzdaten online zu überprüfen, bevor sie überhaupt in artfremde Organismen gelangen. Diese Arbeit müsste in Zukunft – statt von wenigen Gensynthesefirmen wie heute – von der globalen, durch DIY-Biologen stark erweiterten wissenschaftlichen Community übernommen werden. Aufgrund der Fülle an Informationen und Aktivitäten würde es notwendig,

die Aufgabe der Prüfung der Daten auf möglichst viele Wissenschaftler zu verteilen. Durch Mechanismen wie auf wissenschaftlicher Leistung basierende Reputationssysteme und persönliche Authentifizierung bei der Arbeit mit relevanten Informationen könnte die nötige Sicherheit geschaffen werden, da es stets offensichtlich wäre, wer Daten abruft und wozu diese verwendet werden. Für die kommerzielle Nutzung wie auch für die Spitzenforschung, die zumindest zeitweise aus Wettbewerbsgründen auf Geheimhaltung angewiesen sind, eignet sich ein solches Modell nur mit Einschränkungen, aber für eine gemeinwohlorientiere DIY-Bioszene sollte es passen.

Zwar ist es mittelfristig wohl gerade in Europa kein realistisches Szenario, längerfristig sollte jedoch geprüft werden, unter welchen Bedingungen ein physisches »Containment« genetisch veränderter Mikroorganismen – zumindest in Teilen – als oberste Maxime aufgegeben werden könnte. Eine solide Kenntnis über die Auswirkungen transgener bzw. synthetischer Organismen im Ökosystem vorausgesetzt, könnten beispielsweise bereits als sicher bekannte Sequenzen und/oder Organismen gänzlich freigegeben werden. Physisches Containment und dessen strenge behördliche Überprüfung könnten dann auf unsichere Mikroorganismen und deren Anwendungen beschränkt werden. Man müsste so nur bei Arbeiten mit sicherheitsrelevanten Sequenzen prüfen, ob die Person die entsprechenden Sicherungsmaßnahmen einhalten kann oder nicht.

Jegliche Nutzung oder Veränderungen in den Datenbanken müssten für alle klar erkennbar, transparent und eindeutig rückverfolgbar sein. Um unter den teilnehmenden Wissenschaftlern das nötige Vertrauen in die Datenbanken zu schaffen, böten sich beispielsweise als Methoden der Wahl dezentrale und auf redundante Speicherung und Verschlüsselungstechnologie basierende Datensysteme an. Dabei sollte auch sichergestellt sein, dass eine organisierte Überprüfung der Datennutzung nicht zu einer Zentralisierung der Datenspeicherung selbst und damit einer unausgewogenen Kontrolle einiger weniger Personen über die Daten führt, da hierbei die Gefahr von absichtlicher und unabsichtlicher Manipulation der Daten oder eine direkte Beeinflussung der Wissenschaftler zu groß wäre. Die Nutzer der Datenbanken könnten zudem durch persönliche Kontakte ein Netzwerk aufbauen, innerhalb dessen Wissenschaftler mit größerem Vertrauen sensiblere Materialien austauschen können. Dazu könnten Auditsysteme etabliert werden, sodass regelmäßige Selbstkontrolle und Optimierung der Arbeitsweise stattfinden können.

Darüber hinaus müssen die Datenbanken zuverlässig und effizient funktionieren und eine gute Skalierbarkeit aufweisen, um den zu erwartenden exponentiellen Zuwachs an Informationen beherrschen zu können. Je universeller und komfortabler der Zugriff auf die Datenbanken für deren Verwendung und Überprüfung funktioniert, desto mehr Nutzer würden die Datenbanken freiwillig verwenden. Durch einen fortschreitenden, durch die Nutzer zusammengetragenen Wissensfundus über Gensequenzen sowie ihre Verbreitung und Dynamik in Ökosystemen würden sich die Möglichkeiten, die online einsehbaren genetischen Designs zu interpretieren, zunehmend verbessern. So könnten eine grundlegende Sicherheit und Qualität der gentechnischen Arbeiten und Produkte gewährleistet werden, ohne dass es nötig wäre, Informationen zurückzuhalten oder zentrale Kontrollinstanzen heranzuziehen. Ein solches Netzwerk würde also die Übersicht über die Datenbanken bewahren, diese pflegen und gleichzeitig allen am freien Wissensaustausch Interessierten global gleichermaßen Zugang bieten. Und je mehr Nutzer, desto besser könnte eine digitale globale Selbstverwaltung der Anwendungen in der Synbio funktionieren und somit ein verantwortungsvoller und fairer Umgang mit der Technologie geschaffen werden.

Wie ein solches verteiltes Verantwortungs- und Verwaltungssystem bzw. -regime angesichts der global unterschiedlichen Interessen, Regulierungsvorschriften und gesellschaftlichen Positionen

langfristig realistisch umgesetzt werden könnte, kann nicht simpel beschrieben werden. Bei den vorgestellten Überlegungen handelt es sich um visionäre Szenarien, die als Diskussionsgrundlage dienen können und sollen, ganz im Sinn des in Kapitel V.2.1 vorgestellten »Vision Assessments« (Grunwald 2012). Das gleiche gilt für das im Folgenden vorgestellte Konzept für die gemeinwohlorientierte Nutzung der Technologie.

## Bio-Commons 6.3

Wie im Kapitel VI.5.2 beschrieben, können die bisherigen Konzepte zum Schutz geistigen Eigentums wie Patente und Copyright im Kontext der modernen Lebenswissenschaften versagen und zur Tragik der Antiallmende, d. h. der Verhinderung eines sozial erwünschten Resultats führen. Doch auch – und erst recht – die unbegrenzte Verbreitung und Nutzung des Wissens kann negative Konsequenzen haben, wenn ethische und ökologische Dimensionen nicht berücksichtigt werden. Eine globale, dezentrale Nutzung der Synthetischen Biologie könnte einen übermäßigen Verbrauch natürlicher Ressourcen befördern und damit die u. a. im Bereich der biologischen Vielfalt vorherrschende Tragik der Allmende (»tragedy of the commons«) verschärfen (TAB 2014c, S. 116 ff.). Eine besondere Brisanz bekommt diese Problematik, wenn der Mensch selbst als Ressource und Objekt der Synthetischen Biologie genutzt würde.

Da es dabei um fundamentale Fragen zu Vorstellungen von Leben an sich geht, sind kulturelle Werte z. B. in Bezug auf Bioethik und Biopolitik von größter Bedeutung und müssen integraler Bestandteil einer weiter führenden Auseinandersetzung sein. In der DIY-Bioszene-internen Diskussion wurde daher angeregt, einen globalen ethischen Minimalkonsens anzustreben. Durch neue technologische Möglichkeiten scheint es für die Zukunft geboten, eine Neujustierung der Trennlinie vorzunehmen, die zwischen veräußerbarer und nichtveräußerbarer Natur, z. B. der des menschlichen Körpers, unterscheidet. Aktuell diskutiert wird beispielsweise die Zulässigkeit der Möglichkeit, das menschliche Mikrobiom (Gesamtheit aller gutartigen Bakterien, die auf und im Menschen leben) genetisch zu verändern und es damit einem Zugriff durch Schutzrechte wie Copyright und Patenten usw. zugänglich zu machen.

Mit den Tragiken der Allmende und der Anti-Allmende droht also ein doppelter Kollaps der Regulierungskonzepte, der weder dem Individuum noch der Gesellschaft und der Wirtschaft als Ganzes Nutzen bringen kann. Wie könnte sich ein derart aus der Balance geratenes Innovationssystem wieder ins Lot bringen lassen? Eine in der DIY-Bioszene diskutierte Lösung der wirtschaftlichen, bioethischen, biopolitischen und Sicherheitsfragen einer global dezentralisierten Synbio ist die Idee der Bio-Commons, die im Rahmen von »SYNENERGENE« 2014 entwickelt wurde. Durch das Konzept der Bio-Commons soll eine ökonomische Nutzung »synthetischer Konstrukte« ermöglicht werden, die einen freien und fairen Zugang zu Materialien und Information gewährleistet und dabei die Vereinnahmung der Technologie durch Partikularinteressen einzelner staatlicher oder privater Akteure verhindert.

Zu einer grundlegenden Reform des Schutzes geistigen Eigentums in den Lebenswissenschaften nach der Bio-Commons-Idee würde gehören, dass Schutzansprüche unbürokratisch und kostengünstig (am besten gänzlich kostenfrei) von eher kurzer Dauer (wenige Jahre) erworben werden können und diese eine Open-Source- und Open-Access-Nutzung mit Share-alike-Klauseln (soge-

nannte »virale« Klauseln) ermöglichen. Eine kurze Dauer erscheint aufgrund der sehr schnellen Innovationszyklen der Biotechnologie und der hohen Komplexität der Produkte notwendig. Share-alike-Klauseln, wie man sie aus den auf Copyright basierenden Creative-Commons-Lizenzen (Kasten VI.6 in Kap. VI.5.2) kennt, ermöglichen vielen einzelnen Akteuren im privaten und öffentlichen Sektor ihr Wissen in einen Pool zu geben, der alle Einträge unter denselben Bedingungen nutzbar macht. Durch Share-alike-Klauseln werden alle, die ihre Innovationen auf Wissen unter dem Schutz einer solchen Lizenz aufbauen, gezwungen, diese unter denselben Bedingungen weiter zu lizenzieren, was zu einem selbstverstärkenden Anwachsen von Wissen unter diesem Lizenzkonzept führt.

Ermöglicht man also die Nutzung solcher Lizenzen in großen Datenbanken, könnten in kurzer Zeit durch eine »virale« Verbreitung dieses Lizenzmodells große Mengen an Wissen gesammelt werden (wie dies bei den Open-Source-Projekten Linux und Wikipedia der Fall war). Lizenzen, die das Freigeben von Wissen fördern, sind dabei ideale Mechanismen, um brachliegendes Wissen nutzbar zu machen und dadurch ein »Wissens-Lock-in« zu verhindern. Darüber hinaus sollte es möglich werden, Nutzungslizenzen, welche die Einhaltung ethischer Standards erfordern, zu gestalten. Ideen und das zugehörige Wissen könnten so zwar als Allgemeingut freigegeben, aber gleichzeitig an gewisse Bedingungen geknüpft werden. Durch diese Bedingungen entstünde ein Wettstreit der Lizenzen, bei dem das Lizenzmodell, das die meisten Wissenschaftler überzeugen kann, am schnellsten anwächst. Je mehr Wissen unter einem Lizenzregime aber gesammelt wird, desto attraktiver und effektiver wird seine Weiternutzung.

Die Attraktivität eines Lizenzmodells wäre nicht zwangsläufig nur an eine monetäre Nutzbarmachung gebunden. Durch eine Entkopplung der Bewertung des Erfolgs einer Entdeckung oder Erfindung von ihrem Marktwert können auch moralische bzw. ethische Konzepte die Attraktivität eines Lizenzmodells steigern. Beispielsweise könnte der Natur- bzw. Biodiversitätsschutz oder die ausschließlich friedliche Nutzung in der Lizenz festgeschrieben werden. Die Politik könnte im Rahmen der öffentlichen Forschungsförderung bestimmte Lizenzformen festlegen oder zumindest begünstigen. Ein entscheidender Vorteil des Bio-Commons-Modells wäre auch, dass die Community bzw. die gesamte interessierte Öffentlichkeit die Sicherheit und Qualität der Informationen jederzeit überprüfen kann.

Da die Ressource einer zukünftigen Bioökonomie im Wesentlichen digitale Codes wären und bearbeitet werden könnte wie Software, deren physisches Produkt (physische DNA, Protein, Zelle, Organismus etc.) hingegen das genutzte Gut ist, würde grundsätzlich ein gemeinsamer, nichtrivalisierender Konsum möglich. Das Szenario der Tragik der Allmende ist bei solchen sich nicht verbrauchenden, teilbaren Ressourcen ausgeschlossen. Durch eine Bio-Commons-Regulierung würde darüber hinaus die Tragik der Antiallmende effektiv verhindert. Durch die ermöglichte maximale gesellschaftliche Kontrolle könnte die Gefahr eines Missbrauchs minimiert werden, ohne das Potenzial der Technologie unnötig einzuschränken. Die konsequente Ausrichtung auf demokratisch legitimierte bzw. zumindest in größerem Umfang partizipativ fundierte und ethische gerahmte Nutzungszwecke sollte ermöglichen, dass Innovationen in der Synbio mittel- und langfristig als nachhaltige Handlungsoption entwickelt werden können.

# Fazit und Ausblick 7.

Hacken bedeutet, Gegenstände oder auch Ideen aus ihrem ursprünglichen Kontext herauslösen und ihnen eine neue Funktion zu geben. In Industrieländern ist dies häufig ein künstlerischer und spielerischer Umgang mit Technologie, in Entwicklungsländern kann der Ansatz (hier Jugaad genannt; Kasten VI.1 in Kap. VI.3.1) hingegen handfeste Problemlösungen im Alltag bieten. In beiden Fällen werden bestehende Regeln oder vermeintliche Beschränkungen übergangen, um auf möglichst elegante Weise mit komplizierten Sachverhalten umgehen zu können. Eines der Kernanliegen der Biohacker ist es, Wissen, Material und Methoden der Lebenswissenschaften einem breiteren Publikum zugänglich zu machen.

## Entwicklung und Anliegen der DIY-Biologie 7.1

Der momentane Stand der Fähigkeiten von Biohackern in Bezug auf Elektronik und Geräte ist mit dem von professionellen Biotechnologielaboren Mitte der 1990er Jahre vergleichbar. Durch die zunehmende, globale Vernetzung der DIY-Bioszene wird das nötige Wissen und Material rund um den Globus verbreitet und der technische Stand zeitlich beinahe synchronisiert. Dabei wird die Notwendigkeit der (natur)wissenschaftlichen Bildung als Voraussetzung einer Befähigung zur freien Forschung betont und häufig der Anspruch eines jeden Einzelnen auf eine selbstständige forschende Betätigung artikuliert. Forschung ist hier einerseits als forschendes Lernen verstehbar, kann aber auch für den professionellen (sowohl akademischen als auch industriellen) Forschungsbetrieb und für die Kunst von Relevanz sein.

Durch die grundsätzliche Chance für jede Person weltweit, auf wissenschaftliche Erkenntnisse zuzugreifen, sowie durch die leichte praktische Anwendbarkeit von Biohackertechnologie ist diese Form des technologischen Fortschritts dazu prädestiniert, sich ähnlich wie Computertechnologie dezentral auf der ganzen Welt auszubreiten. Schon jetzt findet eine starke Beteiligung von Forschern und Amateuren in Entwicklungs- und Schwellenländern wie Indonesien oder Indien statt. Eine Selbstermächtigung durch den Einsatz von Technologien, die das Leben so fundamental beeinflussen können wie Gentechnik und Synthetische Biologie, erweitert die Handlungsspielräume der beteiligten Akteure bedeutend und sollte als technologische Emanzipationsbestrebung einer globalen Citizen-Science-Szene aufgefasst werden. Für dieses Bestreben reicht in der Regel der etablierte Rahmen institutioneller Forschung nicht aus, da dieser durch bürokratische Regeln, starke Hierarchien und eine Überalterung des Personals (zumindest in Europa) den zumeist jungen Biohackern kaum den benötigten Raum zur Entfaltung eigener Tätigkeiten bieten kann. Um das Jahr 2008 herum entstanden weltweit in großen Ballungszentren der Industrie- und Schwellenländer zumeist gemeinnützig betriebene Biohackerspaces als halböffentlich nutzbare Biolabore. Die dort durchgeführten Arbeiten haben Kunst, Bildung, Gesellschaftskritik, technologische Innovation und Zukunftsszenarien zum Thema. Dies bietet den Mitgliedern und Besuchern die Option, beispielsweise molekularbiologische Techniken in Eigenregie zu erlernen und anzuwenden, ohne von Schulen und Universitäten abhängig zu sein. Die gemeinsamen Merkmale der Hackerspaces sind ihre durchlässigen Strukturen mit flachen Hierarchien, transdisziplinäres Arbeiten und Offenheit für Unkonventionelles.

Durch die zunehmende technologische Emanzipation der DIY-Bioszene und deren mediale Präsenz wurde eine kritische Auseinandersetzung über gesellschaftliche Fragen angeregt. Behandelt werden dabei Probleme im Wissenschaftssystem, ethische, umweltpolitische und Biosicherheitsfragen. Bestrebungen, eigene ethische Regeln in Form von »Codes of Ethics« einzuführen, sind bisher jedoch in ihrer Reichweite begrenzt, da die internationale DIY-Bioszene sehr heterogen ist.

Auch beschäftigte sich die Szene mit dem als zunehmend inadäquat empfundenen Rechtssystem für geistiges Eigentum in den Lebenswissenschaften (Kap. VI.5.2 u. VI.6.3). Eine wichtige Einschätzung des vorliegenden Gesamtberichts ist, dass eine umfassende politische und rechtliche Neugestaltung des Umgangs mit geistigem Eigentum eine der Hauptaufgaben der kommenden Jahre (bzw. wahrscheinlich sogar Jahrzehnte!) für die globale Gemeinschaft auch im Bereich der Biotechnologie/Synbio sein wird (Kap. VII.2.6). Weil auch in der Synbio der »digitale Anteil« immer bedeutsamer wird, wird die Entwicklung der geistigen Eigentumsrechte im Bereich der digitalen Güter insgesamt, die seit einigen Jahren ein hochkontroverses Feld darstellen, von entscheidender Bedeutung sein.

Die Aktivitäten in der DIY-Bioszene lösten bei einigen Experten für Biosicherheit (v. a. in den USA) zu Beginn Diskussionen aus. Es kamen Befürchtungen auf, Biohacker könnten durch Fehler (Bioerror) Umwelt oder Menschen schaden, wissentlich oder unwissentlich kriminelle Handlungen (Biocrime) oder sogar bioterroristische Aktivitäten durchführen. Die Befürchtungen wurden allerdings in den letzten Jahren nach genauerer Analyse der Situation stark relativiert und weitgehend entkräftet.

Dem entgegen steht ein ganz anders gelagertes Problem im Zusammenhang des Bestrebens von behördlicher Seite (zumindest in den USA), die DIY-Bioszene zu kontrollieren oder gar zu lenken. Grundsätzlich sind die Erfolgsaussichten gering, weil die DIY-Bioszene naturgemäß dezentral organisiert ist und die Hackerspaces aufgrund ihrer letztlich einfachen technischen Ausstattung nur eine minimale Infrastruktur benötigen, die leicht installiert und verlegt werden kann. Wenn dennoch ein unangemessener Überwachungsdruck (z. B. als politisch-behördliche Reaktion auf übertriebene mediale Bedrohungsszenarien) ausgeübt würde und sich z. B. professionelle Wissenschaftler aus Selbstschutz aus der Szene zurückzögen und damit ihren Einfluss bei den Amateuren aufgäben (z. B. in Bezug auf die Einhaltung von Sicherheitsvorschriften), könnte gerade dadurch die Wahrscheinlichkeit von Fehlentwicklungen (zumindest in Richtung Bioerror) begünstigt werden.

Durch die Kultur der Transparenz und der freien Onlinekommunikation in der DIY-Bioszene sowie durch die öffentliche Zugänglichkeit der Hackerspaces sollte prinzipiell eine gute Sicherheitslage als Folge der gegenseitigen sozialen Kontrolle gewährleistet sein. In Europa werden zudem alle biotechnologischen Aktivitäten durch Regelungen wie das GenTG erfasst. Statt der Sicherheitsfragen steht mittlerweile vor allem in den USA das wirtschaftliche Potenzial, das durch die Innovationskraft der Szene entsteht, im Fokus, und erste Venturekapitalgeber beginnen, die Start-ups in der Szene mit Geld zu versorgen. Nimmt man an, dass sich, ausgehend von den heutigen Start-ups, erfolgreiche neue Produkte am Markt etablieren, könnte ein eigenständiger wirtschaftlicher Zweig entstehen. Das wirtschaftliche Potenzial der Biohacker-Start-ups wird dabei voraussichtlich auch mittelfristig dem der etablierten Biotechnologie- oder Pharmabranche nicht gleichkommen, könnte aber dennoch zu signifikanter Größe wachsen oder auch mit diesen Branchen verschmelzen bzw. deren Diversität erhöhen.

Die fundamentale Bedeutung der Erkenntnisse aus den modernen Lebenswissenschaften und die neuen Möglichkeiten der Biotechnologie werfen die Frage auf, welche gesellschaftlichen Gruppen und damit Leitbilder und Gesellschaftsentwürfe die Entwicklung in Zukunft prägen werden. Die junge DIY-Bioszene liefert bereits jetzt relevante Impulse für die Debatte über die Perspektiven der Synthetischen Biologie (i. w. S.), ihre gesellschaftliche Nützlichkeit und Erwünschtheit. Bisher ist die Szene mit mehreren Tausend Aktiven zwar noch relativ klein. Ob sie sich weiterhin so dynamisch entwickelt, ist offen. Potthof (2013, S. 16) geht davon aus, dass die Bandbreite der möglichen Positionen, die von DIY-Biogruppen und ähnlichen Akteuren übernommen werden könnten, ähnlich groß sein kann wie die Heterogenität der Szene: von der Betonung der wirtschaftlichen Chancen als Folge der Gründung neuer Biotechnologieunternehmen über eine positive Beeinflussung der öffentlichen Meinung gegenüber den gesellschaftlichen Potenzialen der Gentechnologie bis zu der Ausarbeitung kompetenter technologiekritischer Positionen nach dem Vorbild des Chaos Computer Clubs. Insofern besitzt die Biohackerbewegung fraglos einen Modellcharakter, da in ihr vielfältige Meinungen vertreten sowie Ideen ausprobiert werden und sie die Chance bietet, frühzeitig zukünftige Entwicklungen zu erkennen und zu diskutieren.

## Citizen Science als wichtiger Teil einer engeren Verzahnung von Wissenschaft und Gesellschaft 7.2

Die große mediale Aufmerksamkeit gegenüber der noch relativ kleinen Szene deutet auf ein (unbefriedigtes) Bedürfnis in der Gesellschaft hin, sich intensiver mit den Themen der modernen Biowissenschaften zu befassen. Der mediale Erfolg der DIY-Bioszene im Verhältnis zur öffentlichen Präsenz von Universitäten und anderen Forschungsreinrichtungen ist bemerkenswert. Biohackern gelingt es seit einigen Jahren trotz minimaler Budgets und auffallend einfacher Experimente im Vergleich zu den ungleich besser ausgestatteten und finanzierten staatlichen Einrichtungen, eine erstaunliche öffentliche Aufmerksamkeit zu erlangen.

Das Interesse an der DIY-Biologie unterstreicht die Notwendigkeit, dass sich die Universitäten, aber auch andere Forschungseinrichtungen nicht nur kommunikativ in Richtung Gesellschaft öffnen, sondern in geeignetem Umfang und Zuschnitt konkrete Teilnahmemöglichkeiten an Forschungsvorhaben im Sinn einer Citizen Science ermöglichen (Kap. VI.3.1 u. Kap. VII.2.4). Grundsätzlich wären hierfür flachere Hierarchien sowie ein offener und transdisziplinärer Austausch unter den Wissenschaftlern und mit der Öffentlichkeit förderlich.

Um eine entsprechende Modernisierungen der akademischen Arbeitsweise zu bewirken, wären innerhalb der Forschungsförderung sowie den Universitäts- und anderen Instituten grundlegende strukturelle Reformen und erheblich mehr finanzielle Mittel für Lehr- und Öffentlichkeitsarbeit im akademischen Mittelbau nötig. U. a. wären Karriereanreize zum offenen Publizieren (Open Access) von Ergebnissen sowie für populärwissenschaftliche Arbeiten eine notwendige Voraussetzung für mehr Transparenz und größere Öffentlichkeitorientierung.

Allerdings stellt sich grundsätzlich die Frage, ob es die Universitäten in ihrer Forschungs- und Lehrtätigkeit nicht überbelasten würde, derartige öffentliche Aufklärungs- und Beteiligungsarbeit leisten zu müssen. Gerade in der nichtakademischen Organisation der DIY-Bioszene liegt das Potenzial, eine breitere gesellschaftliche Verständigung über die modernen Biowissenschaften zu fördern. Daher erscheint es insgesamt notwendig, die neuen Initiativen der DIY-Bioszene und damit

den Anspruch dieses Teils der Citizen-Science-Bewegung auf eine echte Teilhabe am Forschungs- und Innovationsprozess auch in ihren unabhängigen Organisationsformen zu stärken und diese Schnittstelle zwischen Forschung, Kunst und Öffentlichkeit zu fördern.

Ein bedeutender positiver Effekt der Bürgerbeteiligung im Rahmen eines fortgeschrittenen Citizen-Science-Programms wäre, dass der engere Kontakt von Wissenschaft und Gesellschaft eine verstärkte gegenseitige Rückkopplung der beiden bewirkt und so das »Aufbrechen der Elfenbeintürme« möglich macht. Engagierte Bürgerwissenschaftler können durch kreatives und interdisziplinäres Denken der Forschung neue Impulse liefern, kritische Fragen stellen und so auf Defizite der Forschungsförderung und der Forschungsabläufe sowie Strukturen selbst hinweisen. Ein größerer Einfluss der Öffentlichkeit auf die Forschung verlangt aber auch mehr Problem- und Verantwortungsbewusstsein sowie Fachwissen. Eine entsprechend geförderte Citizen-Science-Szene könnte die benötigte öffentliche Aufklärungsarbeit leisten und das durch öffentliche Gelder für akademische Forschung erlangte Wissen für ein größeres Publikum nutzbar machen. Hackerspaces, als politisch neutrales Terrain, bieten dabei den geeigneten Raum für Bürger, um sich selbständig in wissenschaftlichen und technologischen Fragen zu bilden, und können gleichzeitig dem geforderten Bürgerdialog eine eigene Bühne bieten.

Dies kann durch eine Kombination von Aufklärung über die Fakten sowie einer künstlerischen Ästhetisierung der Themen und Materialien gelingen. Dabei ist die Grenze zwischen freier Kunst und Information der Öffentlichkeit fließend. Durch eine kritische und künstlerische Reflektion zu epistemischen Fragen nach den Grenzen des Lebendigen, ethischen Fragen zur Nutzung und Manipulation des Lebendigen, gesellschaftlichen Fragen zu Weltbildern sowie zu praktischen Anwendungen in der Gestaltung zukünftiger Räume und Produkte wird eine verstärkte Sensibilität der Bürger für Auswirkung der Forschung erreicht. Die tatsächlichen Risiken und Chancen der Technologien der modernen Lebenswissenschaften werden den Bürgern somit greifbarer und eine eigenständige, unabhängige und aufgeklärte Positionierung befördert.

Des Weiteren können im Rahmen in dieser Auseinandersetzung Visionen für einen sinnvollen Umgang mit Technologie entworfen werden, wie sie z. B. zurzeit in der DIY-Bioszene zum Thema Synthetische Biologie entstehen (Kap. VI.6). Die Genres Bioart und Biofiction können darüber hinaus auch professionellen Wissenschaftlern als Inspirationsquelle für zukünftige Forschungsvorhaben dienen (Hennen/Pfersdorf 2014; Karberg 2012). Durch eine so erreichbare Demokratisierung von Wissenschaft könnten sich Bürger eigenverantwortlich an zukunftsweisenden Entwicklungen beteiligen. Die DIY-Bioszene könnte dann eine wichtige Rolle bei Vermittlung, Kritik und Erforschung möglicher gesellschaftlicher Folgen der Biowissenschaften einnehmen. Je besser der Dialog zwischen Bürgern und Forschung gelingt, desto leichter könnte die Verzahnung von Erkenntnisgewinn und Fortschritt werden.

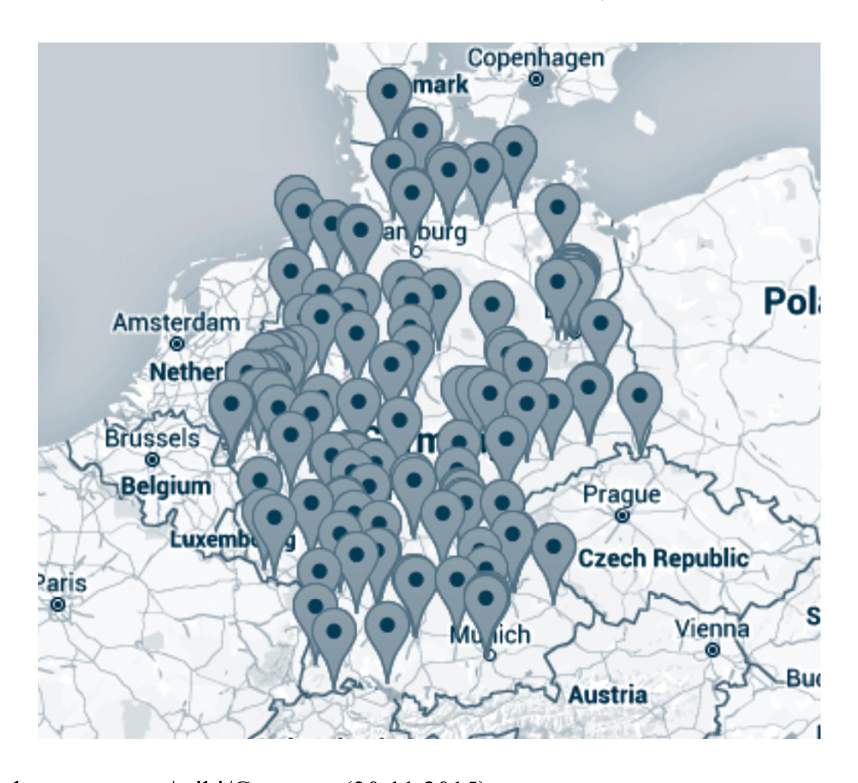
## Förderung durch massvolle Deregulierung? 7.3

Eine gezielte Förderung von DIY-Bioaktivitäten wie in den USA durch das WWICS oder den Niederlanden durch die Waag Society (Kap. VI.4.1) findet in Deutschland bisher nicht statt. Zwar kann man im weiteren Sinn öffentliche Vorlesungen an Universitäten, die Beteiligung der Universitäten am iGEM-Wettbewerb sowie Start-up-Programme für Erfinder, die Geld und Materialzugang ver-

schaffen können, als Unterstützungsmaßnahmen ansehen. Von Bedeutung war und ist auch die Einrichtung »Biotechnologischer Gymnasien« vor allem in Baden-Württemberg (dort allein 24, außerdem einige in Hessen und Sachsen), deren Absolventen fundiertes theoretisches und experimentelles Wissen mitbringen und auch ohne Studium bzw. schon nach kurzer Zeit ernsthafte Forschung betreiben könnten.

Um eine einseitige Vereinnahmung und Instrumentalisierung der Potenziale der Szene durch wirtschaftliche Interessen der Biotechnologieindustrie oder andere Lobbygruppierungen vorzubeugen und eine unabhängige Entwicklung zu fördern, wäre eine öffentliche Unterstützung der DIY-Bioaktivitäten und vor allem der benötigten Infrastruktur notwendig. Eine direkte staatliche Unterstützung von Hackerspaces (allein in Deutschland gibt es über 120; Abb. VI.4), Fablabs (ca. 40), Museen, Galerien und vergleichbaren Einrichtungen, die sich mit Biotechnologien befassen möchten, wäre eine geeignete Maßnahme.

ABB. VI.4BESTEHENDE HACKERSPACES IN DEUTSCHLAND (STAND NOVEMBER 2015)




Quelle: http://hackerspaces.org/wiki/Germany (30.11.2015)

Allerdings würden solche Bildungsmaßnahmen zumindest zum Teil wegen der sehr strengen Regulierung biologischer Arbeiten allgemein und speziell der Gentechnik ins Leere laufen, da die erlernten Fähigkeiten kaum genutzt werden können. Bisher sind gentechnologische Arbeiten selbst auf der niedrigsten Sicherheitsstufe S 1, d. h. »... gentechnische Arbeiten ..., bei denen nach dem Stand der Wissenschaft nicht von einem Risiko für die menschliche Gesundheit und die Umwelt auszugehen ist« (§ 7 GenTG), in Deutschland nur Spezialisten und unter Einhaltung umfassender Schutzmaßnahmen erlaubt (Kasten VI.4 in Kap. VI.4.4). Die hohen Kosten, die durch die Regulierung und Sicherheitsmaßnahmen anfallen, erschweren zudem den Betrieb für gemeinnützige Zwecke erheblich, und selbst der Betrieb eines S-1-Labors in einem Hackerspace ist durch die hohen Kosten für die Sicherheitsmaßnahmen nur in Ausnahmefällen möglich (Kap. VI.4.1).

In Universitäten und ausgewählten Schulen werden Organismen und genetische Systeme der Sicherheitsstufe 1 allerdings bereits heute standardmäßig zu Bildungszwecken verwendet. Im Sinne der Kunst- und Forschungsfreiheit erscheint es angemessen, Bürgern auch außerhalb dieser Lehreinrichtungen mehr Freiheiten zur Entfaltung eigenständiger Aktivitäten einzuräumen und einen generell freieren Umgang mit biologischen Stoffen (auch transgener Art), wenn von ihnen kein Risiko für die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu erwarten ist, auch für private Zwecke zu erwirken. Konkret könnte dafür eine Anpassung der Sicherheitsauflagen auf der untersten Sicherheitsstufe erwogen werden. Es bieten sich dazu zwei konkrete Perspektiven:

**»S-1/2«-SICHERHEITSSTUFE**

Um die Genehmigungsvoraussetzungen für den Betrieb von »Sicherheitslaboren« zu vereinfachen, könnten gentechnische Arbeiten mit Organismen der Risikogruppe 1 (kein Risiko für Mensch und Umwelt) in allen Laboratorien auf der Grundlage einer Anzeigenpflicht, aber ohne besondere Auflagen zugelassen werden. Dies würde bedeuten:

> Wegfall der GenTG-spezifischen baulichen, technischen und organisatorischen Anforderungen an S-1-Labore;
> Reduzierung der GenTG-spezifischen Aufzeichnungs- und Archivierungspflichten für S-1-Versuche.

Um zu gewährleisten, dass die Experimentatoren grundlegende biologische Sicherheitsstandards einhalten, wäre die Einführung einer Sachkundeprüfung sinnvoll, die zur Durchführung von solchen gentechnischen Experimenten befähigt. Die Vorbedingungen für den Erwerb eines solchen Sachkundenachweises sollten dabei jedoch an die aktuelle Ausbildungssituation der Biologen in Deutschland angepasst sein und könnten zum Beispiel auf dem Niveau eines molekularbiologisch ausgerichteten Bachelorabschlusses aufbauen. Die Sachkunde wäre also eine Abstufung zu der bisher verlangten Sachkunde, die erst nach drei Jahren molekularbiologischer Berufserfahrung nach dem Master oder Diplomabschluss zum Betrieb einer gentechnischen Anlage befähigt.

**SELBSTKLONIERUNGSWHITELIST**

Es können aber auch die derzeit schon bestehenden gesetzlichen Spielräume im Hinblick auf die Öffnungsklausel der Richtlinie 2009/41/EG für lang erprobte Standardversuche in Bildung und Ausbildung genutzt und ausgebaut werden. Die sogenannte Selbstklonierung ist bereits jetzt vom GenTG ausgenommen:

»... sofern es sich nicht um ein Vorhaben der Freisetzung oder des Inverkehrbringens handelt und sofern keine gentechnisch veränderten Organismen als Spender oder Empfänger verwendet werden, gelten darüber hinaus nicht als Verfahren der Veränderung genetischen Materials – Selbstklonierung nicht pathogener, natürlich vorkommender Organismen, bestehend aus a) der Entnahme von Nukleinsäuresequenzen aus Zellen eines Organismus, b) der Wiedereinführung der gesamten oder eines Teils der Nukleinsäuresequenz (oder eines synthetischen Äquivalents) in Zellen derselben Art oder in Zellen phylogenetisch eng verwandter Arten, die genetisches Material durch natürliche physiologische Prozesse austauschen können, und c) einer eventuell vorausgehenden enzymatischen oder mechanischen Behandlung. Zur Selbstklonierung kann auch die Anwendung von rekombinanten Vektoren zählen, wenn sie über lange Zeit sicher in diesem Organismus angewandt wurden« (§ 3.31 GenTG).

Die Ausnahmeregelung zu Selbstklonierungsexperimenten wird bereits jetzt bei einigen Anwendungen praktiziert. So wird beispielsweise der Blue-Genes-Experimentierkoffer der Roche Deutschland Holding GmbH als Lehrmaterial an Schulen ausgegeben. Mit dem Genbaukasten können Schüler in einen Sicherheitsstamm von E. coli ein Gen wiedereinführen, dass zuvor aus dem Bakterienchromosom entfernt worden war. Als Vektor dient ein in der Gentechnikpraxis als sicher befundenes Plasmid – das allerdings selbst als rekombinant eingeschätzt werden muss. Die ZKBS bestätigte in einer Stellungnahme jedoch die Anwendbarkeit des Selbstklonierungsparagrafen (ZKBS 2001). Derartige Experimente wären also auch für nichtprofessionelle Kontexte geeignet. Die Komplexität der natürlichen Zusammenhänge, insbesondere die Aussage, dass auch alle natürlichen Wege, auf denen genetisches Material ausgetauscht wird, als Selbstklonierung gelten, macht eine Interpretation des Gesetzes in der Praxis jedoch sehr schwierig. Es böte sich also im bestehenden Rechtsrahmen an, eine allgemein gültige und kontinuierlich erweiterbare Liste (Whitelist) mit biologischen Stoffen zu etablieren, die Rechtssicherheit für gentechnische Arbeiten außerhalb registrierter Labore schafft. Darunter könnten standardmäßig alle etablierten und als sicher bekannten biologischen Stoffe (Gene, Vektoren, Organismen usw.) gezählt werden. Biologische Stoffe, die in einem solchen Whitelistsystem geführt werden, könnten zum Beispiel ohne Genehmigung und ohne aufwendige Containmentmaßnahmen spezieller Gentechnologielabore verwendet und (im Fall von DNA) auch rekombiniert werden. Eine Freigabe durch eine zentrale Behörde sollte dabei mindestens deutschlandweite Gültigkeit besitzen, idealerweise aber auf EU-Ebene eingeführt werden. Bereits bestehende Ausnahmeregelungen für erprobte Gensequenzen und etablierte Standardorganismen sollten dabei EU-weit harmonisiert werden. Die entsprechenden biologischen Materialien könnten durch Universitäten oder andere öffentliche Einrichtungen wie zum Beispiel das Leibniz-Institut DSMZ Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH[204] unter offenen (und gegebenenfalls nichtkommerziellen) Nutzungslizenzen ausgegeben werden. Eine Überarbeitung des GenTG wäre auch generell zu prüfen, da es sich bisher nur auf wirtschaftliche Wertschöpfung und wissenschaftliche Forschung bezieht (§ 1.3 GenTG). Es böte sich an, die Zielsetzung des Gesetzes im Sinne der grundgesetzlich verankerten Forschungsfreiheit auch auf die Nutzung durch Kunst und Bürgerwissenschaft zu erweitern.

204 www.dsmz.de/de/start/schueler-und-lehrer.html (30.11.2015)

# RESÜMEE UND AUSBLICK: ZUKUNFTSFRAGEN UND HANDLUNGSFELDER VII.

Die vorhergehenden ausführlichen Kapitel III bis VI sind das Resultat des in der Einleitung (Kap. I) beschriebenen Vorhabens, eine möglichst umfassende, aber konzentrierte Einordnung der Debatten über die Potenziale und Perspektiven der Synbio in größere wissenschafts-, forschungs- und innovationspolitische Kontexte vorzunehmen. Eine zu akademische Betrachtung der Frage nach dem Wesen der Synbio und die vertiefte Darstellung überwiegend spekulativer Visionen bzw. Szenarien zukünftiger Anwendungen und deren möglicher Konsequenzen sollte dabei explizit vermieden werden.

Im nun folgenden, abschließenden Kapitel geht es um die Herausarbeitung und Charakterisierung wichtiger verbundener, zukunftsrelevanter Themen und Handlungsoptionen für den Hauptadressaten dieser Untersuchung, den Bundestag und speziell den ABFTA. Als Ausgangspunkt für die Beschreibung der Handlungsfelder (in Kap. VII.2) werden in Kapitel VII.1 unter Rückgriff auf Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung die Fragen des Neuigkeitswerts und der gesellschaftlichen Relevanz der Synbio sowie der politischen Zuständigkeiten behandelt. Die Schlussbetrachtung (Kap. VII.3) beleuchtet dann die mögliche Rolle der Synbio in der neuen Runde der Gentechnikdebatte, die durch die Entwicklungen im Frühjahr 2015 absehbar war.

## Neuigkeitswert, gesellschaftliche Relevanz und politische Zuständigkeiten 1.

Welches sind die wichtigen Zukunftsthemen und Handlungsfelder im Bereich der Synbio? Die Antworten auf drei Leitfragen können eine Grundlage für die Einschätzung der (forschungs)politischen Relevanz bieten:

> Welche konkreten (wissenschaftlichen) Neuerungen bringt die Synbio mit sich?
> Welche zukünftige gesellschaftliche Bedeutung ist absehbar?
> Worin liegen (forschungs- bzw. wissenschafts)politische Aufgaben und Zuständigkeiten

### Neuigkeitswert 1.1

#### ZWISCHEN KONTINUITÄT UND ECHTER NEUHEIT: VERFAHREN DER SYNBIO IN WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNIK

Im Bereich der naturwissenschaftlichen Forschung und Entwicklung stellen viele der Methoden und Projekte, die unter dem Begriff Synbio zusammengefasst werden, fraglos Neuerungen dar – und können doch gleichzeitig fast immer als eine Fortführung seit Langem verfolgter molekularbiologischer, vor allem gentechnischer Ansätze interpretiert werden. Diese von vielen Akteuren wahrgenommene Gleichzeitigkeit bzw. Ambivalenz von Neuartigkeit und Kontinuität ist die Hauptursache für die nach wie vor bestehenden Abgrenzungs- und Definitionsschwierigkeiten. Die im vorliegenden Bericht eingeführte Unterscheidung von Synbio im engeren und Synbio im weiteren Sinn

(Kap. II.2) kann bzw. soll diese Schwierigkeiten ein wenig abmildern, indem besser zwischen Visionärem und Konkretem differenziert werden kann:

Die Synbio i. e. S. – also die Herstellung von »am Reißbrett« entworfenen und de novo konstruierten Zellen oder Organismen (oder auch von zellfreien biologischen bzw. biochemischen Systemen) zur Produktion beliebiger, auch völlig neuartiger Substanzen oder visionärer Anwendungen im Gesundheits-, Energie- oder Umweltbereich – würde zweifellos eine echte Innovation darstellen, wenn sie denn gelänge. Die bisherigen Fortschritte bei der Erforschung und Entwicklung von Protozellen sowie in der Xenobiologie sind methodisch und wissenschaftlich hochinteressant und liefern seit Längerem Material für die mediale Berichterstattung – die Anwendung derartig grundlegend veränderter bzw. vom Menschen »designter« biologischer Systeme liegt jedoch noch in weiter Ferne.

Konkrete Neuerungen auf Produktebene können in den kommenden Jahren hingegen von der Synbio i. w. S. erwartet werden, d. h. von zunehmend informationsbasierten und computergestützte Design- und Modellierungsprozesse einbeziehenden Ansätzen für die molekularbiologische Veränderung bekannter Organismen. Diese zielen oft auf die Integration neuer Synthesewege zur Herstellung von Chemikalien oder das Design genetischer Schaltkreise für neue sensorische und regulatorische Funktionen ab (Kap. III). Solange die neuen Verfahren, Anwendungen und Produkte vorrangig einer Fortschreibung von seit Längerem verfolgten bio- und gentechnologischen Strategien entsprechen, dürften sich kaum qualitativ ganz neuartige sozioökonomische oder ethische Fragen ergeben (Kap. VII.1.2).

Im ersten Quartal 2015 haben sich die Methoden des Genome Editing wie CRISPR/Cas (Kap. IV.1.2), die bisher meist nicht unter dem Label Synbio behandelt werden, in den Vordergrund der wissenschaftlichen und regulativen Debatte geschoben. Ihr Innovationspotenzial leitet sich nicht so sehr aus einer grundlegend neuen Herangehensweise für die »Herstellung« von neuen Organismen (wie bei der Synbio postuliert) ab, sondern aus großen Fortschritten bezüglich der Einfachheit und Geschwindigkeit, präzise und zielgerichtete Veränderungen an Genomen vornehmen zu können, einschließlich der Genome von Pflanzen, Tieren und des Menschen. Diese vordergründig quantitativen technischen Fortschritte lassen zum Beispiel dauerhafte Eingriffe in das menschliche Erbgut (in sehr frühen Embryonenstadien) »plausibler«, da einfacher machbar, erscheinen – und provozieren damit die Frage nach der Legitimität von Keimbahneingriffen auf neue und drängende Weise.

Gegenüber den Visionen der Synbio i. e. S., aber auch den bisher dominierenden Projekten der Synbio i. w. S., die sich vorrangig auf industriell zugerichtete Mikroorganismen beziehen, kaum aber auf Anwendungen an Pflanzen, Tieren oder gar am Menschen, hat die Weiterentwicklung der Genome-Editing-Methoden daher ein vergleichsweise größeres Besorgnispotenzial. Die an die Frühzeit der Gentechnik in den 1970er Jahren erinnernden (und sich darauf konkret beziehenden) Warnungen aus der Wissenschaft vor einem unreflektierten »Weiter so« bzw. die Forderungen nach einem Moratorium zumindest für Anwendungen am Menschen (Baltimore et al. 2015; Lanphier et al. 2015) dürften aller Voraussicht nach die künftige Gesamtdebatte über die Weiterentwicklung und -nutzung von Genmanipulationstechniken prägen – und damit auch die Synbio als Forschungsbereich und Fördergegenstand.

**ERWEITERTE AKTEURSKREISE**

Im Vergleich zur bisherigen Gentechnikdebatte wirklich neu erscheint die Erweiterung der beteiligten Akteurskreise innerhalb und außerhalb der Wissenschaft bzw. des bisherigen biowissenschaftlich basierten Innovationssystems. Bei den Disziplinen betrifft dies die gewachsene Rolle der Ingenieur- und Materialwissenschaften, der Chemie, der Bioinformatik und -physik bzw. deren verstärktes Zusammenspiel, wobei auch hier eine Traditionslinie seit Entwicklung und Etablierung der Gentechnologie gesehen werden kann.

Eine explizite Neuerung im universitären Bereich besteht in der Unterstützung von selbstständigen Aktivitäten des akademischen Nachwuchses im Rahmen des iGEM-Wettbewerbs, aber z. B. auch im Rahmen von Großforschungsprojekten wie der Synthese eines Hefechromosoms, bei dem »undergraduates«, also Studierende in frühen Ausbildungsabschnitten, eine wesentliche Rolle gespielt haben (Callaway 2014). Außerhalb der Universitäten und sonstiger Forschungseinrichtungen sind zwei Entwicklungen prägend: zum einen das zunehmende, selbstbestimmte Engagement von Künstlern, Designern, interessierten Laien sowie quasi professionellen DIY-Bio(techno)logen, auch wenn sie meist noch keine Synbio (selbst i. w. S.) betreiben – dies aber durchaus gerne tun würden (Kap. VI); und zum anderen die Einbeziehung möglichst vieler gesellschaftlicher Akteure in gezielte Projekte der Begleitforschung schon in frühesten Stadien der Technologieentwicklung als Teil eines neuen Konzepts »verantwortlicher Forschung und Innovation« (RRI), bislang vor allem durch die EU sowie besonders aktiv die Synbio fördernde Länder wie die Niederlande oder das Vereinigte Königreich (Kap. V.2).

**EIN NEUER IMPULS FÜR DIE GENTECHNIKDEBATTE(N)?**

Unter dem Sammelbegriff Synbio wurde die Aufspaltung der Gentechnikdebatte in medizinische, landwirtschaftliche und industrielle Anwendungen – zumindest teilweise – wieder rückgängig gemacht. Diese hatte sich seit den 1990er Jahren gerade in Deutschland fest etabliert, mit den bekannten Einstellungsunterschieden in Gesellschaft und Politik gegenüber Roter, Grüner und Weißer Biotechnologie (Gill 2011; Sauter 2005; Wieland 2011). Auch in der sozial- und politikwissenschaftlichen, rechtlichen und ethischen Begleitforschung (einschließlich der TA) hatten sich weitgehend separierte Fachkreise, Debatten und Untersuchungs- bzw. Bewertungsansätze gebildet: Bioethisch verhandelt wurden vor allem die medizinischen Anwendungen (beispielsweise durch den Deutschen Ethikrat), bei den landwirtschaftlichen Anwendungen hingegen dominierte die Frage nach Umwelt- und Sozialverträglichkeit sowie globaler Gerechtigkeit im Sinn einer Nachhaltigkeitsbewertung (beispielsweise durch den Sachverständigenrat für Umweltfragen oder den deutschen Rat für Nachhaltige Entwicklung sowie viele NRO aus dem Umwelt-, Ökolandwirtschafts- und Entwicklungsbereich).

Die industrielle (oder »Weiße«) Biotechnologie (IBT) in Form der mikrobiellen Stoffproduktion wurde und wird insgesamt am nüchternsten mit Blick auf ihre konkreten ökonomischen und ökologischen Potenziale diskutiert (TAB 2015a und 2015b), wofür es vor allem zwei Gründe gibt: Einerseits wurden dadurch, dass sie in geschlossenen Anlagen (und in Fortführung langjähriger Praxis aus »vorgentechnischen« Zeiten) betrieben wird, kaum fundamentale Umwelt- oder Gesundheitsrisiken angenommen bzw. behandelt, sondern vielmehr konkrete Ökobilanzen (der Produktionsverfahren selbst und der Verwendung der Produkte, wie z. B. Waschmittelenzyme, teils in großen Diskursverfahren unter Einbeziehung unterschiedlicher gesellschaftlicher Akteure) erstellt. Anderer-

seits dominiert bei der Frage nach dem Pro und Kontra des Einsatzes bio-/gentechnologischer Verfahren gegenüber konkurrierenden physikalisch-chemischen Methoden in den Industrieunternehmen eine betriebswirtschaftliche und ökologische Sichtweise auf Vor- und Nachteile, ohne damit grundsätzliche Standortdebatten zu verbinden (wie z. B. bei der Grünen Gentechnik oder der Stammzellforschung, bei denen Wissenschafts- und Industrievertreter angesichts der öffentlichen Skepsis und restriktiver Regulierung regelmäßig den Forschungs- und Industriestandort als Ganzes gefährdet darstellen).

Die Synbio umfasst nun (wieder) alle Anwendungsbereiche (medizinisch, landwirtschaftlich, industriell), wobei der bisherige Schwerpunkt im Bereich der chemischen und pharmazeutischen Stoffproduktion liegt (Kap. III) – und damit in den Bereichen, die schon bei der Gentechnik den wenigsten Widerstand hervorgerufen haben. In Entsprechung zu den bereits genannten erweiterten Akteurskreisen in Wissenschaft, Begleitforschung und Zivilgesellschaft hat sich in der Debatte über die Potenziale und die verantwortungsvolle Weiterentwicklung und Nutzung der Synbio gegenüber den »farblich« separierten Gentechnikdiskursen zumindest eine gewisse Akzentverschiebung ergeben. Sowohl im Kontext der Governance-/Diskursprojekte (Kap. V) als auch in der Biokunst- und DIY-Bioszene (Kap. VI) zeigt sich eine größere (Gen-)Technikoffenheit, die Skepsis bzw. fundamentale Ablehnung erscheint nicht so dominant wie gegenüber der Grünen Gentechnik. Ob dies auch bei einer gesellschaftlichen Ausweitung der Debatte und bei einer Anwendung der Synbio auf Pflanzen bzw. die Lebens- und Futtermittelproduktion der Fall bleibt oder ob sich doch eine stärkere Gegenbewegung formieren wird, dürfte sich vielleicht schon bald im Zusammenhang mit der Debatte über die Genome-Editing-Verfahren zeigen. Die deutschen Akademien haben die neuen Verfahren zum Anlass genommen, einen weniger restriktiven Umgang mit der Pflanzengentechnik zu fordern (Leopoldina et al. 2015), der gentechnikkritische Verein Testbiotech befürwortet das Gegenteil, spricht von einer möglichen »Ära der Super-Gentechnik« und bezeichnet die neuen Verfahren der Pflanzenzucht als »synthetische Gentechnik« (Then 2015). Es ist auf jeden Fall zu erwarten, dass die weitere Diskussion zur Synbio nicht getrennt werden kann von der absehbaren intensiven Debatte über die Genome-Editing-Verfahren, weil diese zu einer Synbio i. w. S. gehören. Dass es infolgedessen zu einer Engführung des Begriffs entsprechend der im vorliegenden Bericht gewählten Definition von Synbio i. e. S. kommen wird, erscheint nicht ausgeschlossen.

## Veränderungspotenzial/Relevanz 1.2

Welche zukünftige Relevanz aber kann aus dem Neuigkeitswert abgleitet werden? In der Forschungs- und Innovationsdebatte wird die Relevanz neuer Technologien üblicherweise mit ihrem (sozioökonomischen) Veränderungspotenzial oder mit einhergehenden möglichen Risiken (bzw. der Notwendigkeit ihrer Vermeidung) begründet. Bio- und Informationstechnologien (als Ausgangstechnologien der Synbio) werden seit vielen Jahren als Schlüsseltechnologien bewertet, die eine Vielzahl neuer Produkte und Dienstleistungen ermöglicht haben, wodurch naturgemäß andere, vorher bestehende Alternativen im Wettbewerb verdrängt worden sind. Dabei war das Veränderungspotenzial der Informations- und Kommunikationstechnologien, die sämtliche Lebensbereiche bis ins Privateste hinein bereits durchdrungen haben, in der Vergangenheit allerdings deutlich größer als das der Biotechnologie.

Die durch die Bio- bzw. Gentechnologie ausgelöste ökonomische Transformation konzentrierte sich bislang vor allem auf die Agrarchemie- und die Saatgutindustrie, mit zum Teil weit reichenden

Auswirkungen auf die globale Landwirtschaft in technologischer, sozioökonomischer, rechtlicher und kultureller Hinsicht, u. a. über die Etablierung des Patentschutzes im Saatgutsektor (Meyer et al. 2013; TAB 2008b). Auch in der Medizin bzw. dem Gesundheitswesen spielen molekularbiologisch basierte Diagnose- und Therapieverfahren, insbesondere im Bereich der Impfstoffe sowie der Krebsbehandlung, eine zunehmende Rolle. Aber insgesamt hat die Bio- bzw. Gentechnologie bislang keine den Informations- und Kommunikationstechnologien vergleichbare Veränderung der Gesellschaft herbeigeführt. Eine echte, alle Wirtschafts- und damit Lebensbereiche durchdringende »Bioökonomie« stellt vielmehr nach wie vor eine Zielstellung dar, deren zukünftige Ausgestaltung ein in vieler Hinsicht offenes, weites und tendenziell hochkontroverses Handlungsfeld für Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und alle anderen gesellschaftlichen Stakeholder ist.

Der bisherige Entwicklungs- und Anwendungsstand der Synbio hat noch keine wirklich bedeutsamen sozioökonomischen Effekte hervorgerufen, und auch die absehbaren Produkte der kommenden Jahre lassen dies nicht erwarten (Kap. III). Im Bereich der Chemie- und Biokraftstoffproduktion wird ein ganz entscheidender Faktor der Ölpreis sein, der die Konkurrenzfähigkeit der Bioenergieproduktion insgesamt sowie das Forschungsengagement der großen Industrieunternehmen prägt. Ein fundamentaler, quantitativ relevanter Einfluss von Synbio-Ansätzen auf die Produktion und die Nutzung der landwirtschaftlichen Biomasse ist weder auf globaler noch auf regionaler Ebene derzeit absehbar.

Die konkreten sozioökonomischen Auswirkungen der in Kapitel III.1 angesprochenen, seit 2014 auch öffentlich stärker wahrgenommenen Beispiele der Vanillin- und Algenölproduktion genauso wie des langjährigen Vorzeigeprodukts der Synbio, der hefebasierten Artemisininherstellung (Kap. III.3.5), sind trotz des fortgeschrittenen Entwicklungsstands nicht verlässlich abzuschätzen. Weitere anwendungsreife Produkte bzw. Verfahren der Synbio i. w. S. sind in den kommenden Jahren bei kleinvolumigen, aber hochpreisigen Spezialchemikalien und vor allem im Gesundheitsbereich zu erwarten, d. h. bei Pharmaka, sonstigen Therapeutika, Impfstoffen sowie gen- und zellbasierten Therapien. Inwiefern sich diese im Einzelfall tatsächlich auf dem Markt durchsetzen können, wird von der Überlegenheit gegenüber vorhandenen und zukünftigen alternativen Produktions- bzw. Behandlungsverfahren abhängen.

Ob die Verfahren und Produkte der Synbio – sowohl i.e. als auch i. w. S. – jemals eine so große Alltagsverbreitung und fundamentale Bedeutung für die »bioökonomische Gesellschaft« erlangen werden, wie es von Rüdiger Trojok als Zukunftsperspektive der DIY-(Syn-)Biologie beschrieben wurde (Kap. VI.6), lässt sich nicht verlässlich prognostizieren. Neben der technischen und betriebswirtschaftlichen Effizienz spielen Fragen der Umwelt- und Sozialverträglichkeit eine entscheidende Rolle für die gesellschaftliche Akzeptanz. Gerade die Geschichte der Gentechnik zeigt, dass für eine erfolgreiche Verbreitung bei Weitem nicht allein die Eigenschaften der Technologie, sondern ebenso der gesellschaftliche Wertediskurs und die politische Rahmensetzung ausschlaggebend sind. In dieser Hinsicht könnte die in Kapitel VIII.1.1 erwähnte Erweiterung der Akteurslandschaft über eine Veränderung der Gentechnikdebatte auch in Europa bzw. Deutschland auf Dauer Wirkung zeigen. Eine naheliegende Annahme ist, dass es – zumindest global gesehen – auf Dauer nicht um ein Ja oder Nein geht, sondern dass sowohl traditionelle Verfahren zur intelligenten Nutzung der existierenden biologischen Vielfalt und ihrer immanenten Eigenschaften (auf Basis einer wissensintensiven Agrarökologie; Meyer 2010) als auch Synbio-Methoden, die auf einer möglichst umfassenden Umgestaltung bis hin zur Neukonstruktion »biologischer« Systeme/Organismen beruhen, eingesetzt werden – ähnlich, wie heute sowohl ökologische als auch konventionelle Landwirtschaft betrieben wird.

Dabei dürfte die Bedeutung der Synbio in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen je nach wirtschaftlichem Erfolg und gesellschaftlicher Akzeptanz ganz unterschiedlich ausfallen, analog zur Situation bei der »konventionellen« (Grünen, Roten und Weißen) Gentechnik.

Mit Blick auf das eingangs erwähnte zweite Relevanzkriterium für eine vorausschauende politische Befassung – die möglichen einhergehenden Risiken bzw. die Notwendigkeit ihrer Vermeidung – hat die Analyse der Sicherheitsfragen der Synthetischen Biologie (Kap. IV) gezeigt, dass sowohl im Bereich der Biosafety als auch der Biosecurity Entwicklungen absehbar bzw. bereits eingetreten sind, welche eine Überprüfung und gegebenenfalls Revision der derzeitigen Risikobewertungs- und Regulierungsverfahren nötig machen (Kap. VII.2.2).

## Zuständigkeit und Aufgaben der (Forschungs- und Wissenschafts-)Politik 1.3

Politisches Handeln mit Bezug auf neue wissenschaftliche Entwicklungen und daraus resultierende Technologien kann sich insbesondere auf eine Förderung, Rahmung und Steuerung von FuE-Aktivitäten (einschließlich öffentlicher Diskursaktivitäten; Kap. V.2), auf die Schaffung adäquater Marktbedingungen sowie auf die vorsorgende Abwehr möglicher Gefahren bzw. unerwünschter gesundheitlicher, ökologischer oder sozialer Folgen richten.

### NUTZEN- BZW. OPTIONENORIENTIERTE FUE-FÖRDERUNG

Eine öffentliche, nationale wie europäische Forschungsförderung ist insbesondere in den Bereichen wichtig, in denen privatwirtschaftliche Akteure nicht oder nur wenig aktiv sind (die ansonsten in Deutschland insgesamt zwei Drittel der FuE-Aufwendungen bestreiten; BMBF 2015). Dies gilt zunehmend für große Bereiche der Grundlagenforschung, u. a. weil in frühen Forschungsstadien eine spätere kommerzielle Nutzung meist völlig unabsehbar ist und oft auch gar nicht angepeilt wird. Hinzu kommen in der Biomedizin angesichts enormer Entwicklungs- und Zulassungskosten wenig profitable Anwendungsbereiche wie die Entwicklung von Therapeutika für sogenannte vernachlässigte (tropische) Krankheiten (»neglected diseases«) sowie zunehmend auch die Entwicklung neuer Antibiotika.[205] Ebenso gehören hierzu Biotechnologiebereiche, die einen besonderen Aufwand für die Entwicklung von Produktionsprozessen im industriellen Maßstab (Stichwort: Demonstrations-/Pilotanlagen) erfordern, wie z. B. neue Generationen von Biotreibstoffen (OECD 2011) oder die sogenannten Bioraffinerien (TAB 2015a u. 2015b). Wie weit die öffentliche Förderung von anwendungsorientierter FuE gehen soll, einschließlich möglicher (auch negativer) Folgen für private Investitionen, ist seit Jahrzehnten Gegenstand von Debatten bzw. muss immer wieder (gesellschaftlich und politisch) neu ausgehandelt werden. Das BMBF hat auf jeden Fall in den vergangenen 20 Jahren eine sehr aktive Rolle bei der Unterstützung von Unternehmensgründungen in der Biotechnologie gespielt.[206]

In den vergangenen Jahren sind die Forderungen lauter geworden, bei der Festlegung von Forschungsschwerpunkten und der Ausgestaltung von Forschungsprogrammen nicht nur wie traditionell lange Zeit üblich vorrangig Wissenschaft und Wirtschaft, sondern möglichst viele weitere gesellschaftliche Akteure zu beteiligen. Durch die Beteiligung beispielsweise von NRO aus dem Umwelt-, Gesundheits-, Sozial- oder Entwicklungsbereich, aber auch von nichtorganisierten Bürgern

205 www.who.int/bulletin/volumes/89/2/11-030211/en/ (27.11.2015)
206 www.biotechnologie.de (27.11.2015)

wird erwartet, dass eine größere Vielfalt von Ideen sowie bislang vernachlässigtes Wissen in Forschungsagenden einfließen kann und dadurch nicht nur mehr, sondern auch umsichtigere und nachhaltigere Problemlösungsoptionen entwickelt werden können. Auch soll hierdurch die gesellschaftliche Nachfrage gezielter erfasst und berücksichtigt werden können. Die Exekutive hat diese Überlegungen aufgegriffen, sodass die Teilhabe von Bürgern sowie von Akteuren der Zivilgesellschaft an der Ausgestaltung von Forschungsagenden u. a. Eingang in den letzten Koalitionsvertrag gefunden hat. Darüber hinaus wird seit einiger Zeit die Beteiligung interessierter Bürger an geeigneten Forschungsvorhaben als Form der Citizen Science gefördert (Kap. VI.2 in Kap. VI.1.3.1). Eine noch weiter gehende, eigenbestimmte Bürgerforschung, wie sie von den DIY-Biologen betrieben wird, ist hingegen bislang noch kein expliziter Gegenstand öffentlicher Förderung (Nascimento et al. 2014).

**SOZIOÖKONOMISCHE RAHMENBEDINGUNGEN**

Für die Erarbeitung von spezifischen Produktnormen oder Zulassungsregeln ist es bei (praktisch) allen im vorliegenden Bericht berücksichtigten Entwicklungen *zu früh*. Erst wenn Produkte näher an der Marktreife sind, kann hier politischer Handlungsbedarf entstehen. Perspektivisch müssten beispielsweise im Bereich der Bioenergieproduktion die dort gültigen Nachhaltigkeitszertifizierungsregeln auf Synbio-Produkte angewendet und gegebenenfalls um weitere sozioökonomische und ethische Kriterien erweitert werden (Buyx/Tait 2011). Im Lebensmittelbereich könnte die Verordnung (EG) Nr. 258/97 (Novel-Food-Verordnung) und in der Medizin die Protokolle der klinischen Prüfung betroffen sein, die gerade bei neuartigen Therapieverfahren hochspezifisch sind und einer permanenten Überprüfung und Weiterentwicklung unterliegen (TAB 2009).

Ein großes Zukunftsthema ist der Umgang mit dem Schutz und der Nutzung von Daten bzw. Forschungsergebnissen, gerade wenn diese mit öffentlichen Mitteln erarbeitet wurden oder aber wenn es besondere Gründe gibt, dass sie der Allgemeinheit zur Verfügung stehen und nicht einer privatwirtschaftlichen Verwertung unterworfen werden sollten (wie beispielsweise die bloßen Sequenzdaten der menschlichen, tierischen, pflanzlichen und sonstigen Genome). Im Zuge der anhaltenden Digitalisierung aller Lebens- und Wirtschaftsbereiche erlangen große Datensammlungen (Big Data) und ihre informationsbasierte (kommerzielle) Auswertung und Nutzung (Data Mining) einen so großen Stellenwert, dass die Anpassung und Fortentwicklung der geistigen Eigentums- bzw. Schutz- und Nutzungsrechte in den unterschiedlichen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Anwendungsbereichen auf nationaler, europäischer und globaler Ebene eine der zentralen und schwierigsten politischen Aufgaben der kommenden Jahre ist. Die Rechtsmaterie ist dabei im Bereich biologischer Daten und Patente sowie anderer Schutzrechte von besonderer Komplexität und seit Jahren Gegenstand vielfältiger Regulierungsbemühungen (z. B. über die europäische »Biopatentrichtlinie« 98/44/EG, das Nagoya-Protokoll der UN-Biodiversitätskonvention, die Datenschutzvorschriften oder in Deutschland das Gendiagnostikgesetz).

Nicht nur im Bereich der Bio- und der Informationstechnologie wird neben der genannten Marktordnung durch Regulierung regelmäßig die Schaffung eines investitionsfreundlichen und innovationsorientierten Wirtschaftsklimas als Ziel politischen Handelns genannt. Die Risikobereitschaft von Geldgebern für Unternehmensgründungen wird aber nur zum Teil von staatlicher Wirtschaftspolitik geprägt, mindestens ebenso wichtig erscheinen in der Gesellschaft vorhandene grundsätzliche Einstellungen und Handlungsmuster.

**RISIKOVORSORGE DURCH SICHERHEITSFORSCHUNG**

Ein dritter Aufgabenbereich besteht bei der öffentlichen Förderung der *Sicherheits- als Vorsorgeforschung* zur Erkennung und Abwehr möglicher Gefahren.

Dass Forschungsgruppen oder auch ganze Einrichtungen, die an zukünftigen Anwendungen arbeiten, nicht von sich aus und parallel zur Produktentwicklung alle möglichen unerwünschten gesundheitlichen, ökologischen oder sozialen Folgen untersuchen können, ist offensichtlich und kein sinnvoller Kritikpunkt. Eine umfassende vorausschauende Risikoforschung kann – zumindest bei neuen Technologien mit grundlegenderen neuen Eigenschaften und/oder Anwendungspotenzialen, wie beispielsweise im Fall der Nanotechnologie – von einzelnen Akteuren weder hinsichtlich der Kompetenzen und der Kapazitäten noch hinsichtlich der möglichen gesellschaftlichen Glaubwürdigkeit und Akzeptanz geleistet werden. Vielmehr ist hier die Politik gefragt, eine umfassende und unabhängige Untersuchung möglicher Risiken zu organisieren und – gegebenenfalls unter angemessener monetärer Beteiligung privater Akteure oder Interessengruppen wie Industrieverbänden – öffentlich zu finanzieren (solange es nicht um vorgeschriebene Untersuchungen im Rahmen von Produktzulassungen geht, die vom Antragsteller bezahlt werden müssen). Das frühe Stadium der meisten Synbio-Entwicklungen limitiert zwar die Möglichkeiten der praktischen Risikoforschung, aber gerade mit Blick auf eine mögliche zukünftige Produktentwicklung erscheint es notwendig, so früh wie möglich zu analysieren, welche der üblichen Schutzgüter (Umwelt, Gesundheit, sozioökonomische Chancengleichheit) durch welche Verfahren und Projekte negativ beeinflusst werden können. Nachdem die Bundesprogramme zur biologischen Sicherheitsforschung der (Grünen) Gentechnik vor wenigen Jahren eingestellt worden sind, öffnet sich hier ein sehr konkretes Aufgabenfeld für forschungspolitisches Handeln.

## Handlungsfelder 2.

Insgesamt resultiert aus den Überlegungen zu Neuigkeitswert, Veränderungspotenzial und Zuständigkeit die klare Einschätzung, dass die Synbio in verschiedener Hinsicht ein relevantes Zukunftsthema für die Politik ist. Selbst wenn Synbio i. e. S. auf längere Zeit wenig praktische Bedeutung erlangen dürfte – die Synbio i. w. S. hat bereits Einfluss genommen auf die Debatte über Potenziale und Perspektiven der Bio- und Gentechnologie und dürfte dies in Zukunft noch stärker tun. In der Gesamtschau der Ergebnisse des vorliegenden Berichts ergeben sich sechs Handlungsfelder bzw. Themenbereiche, vorrangig für die Forschungspolitik, teils auch für die (vorsorgende) Umwelt- und die Wirtschaftspolitik:

- Grundlagen- und anwendungsbezogene Förderung von Forschung und Entwicklung;
- prospektive Biosicherheitsforschung als Basis zukünftiger Risikoabschätzung und -regulierung;
- Beteiligungsformen und -formate für Stakeholder und die breitere Öffentlichkeit bei der Ausgestaltung von Forschungsagenden;
- Potenziale, Perspektiven und Voraussetzungen einer aktiven Teilhabe von Bürgern an biotechnologischer Forschung in Form von Citizen Science/DIY-Biologie;
- Förderung der systematischen Auseinandersetzung aller Forschungsakteure mit der Dual-Use-Problematik in den Biowissenschaften, Weiterentwicklung von Selbstverpflichtungen sowie konkreter Kontrollmaßnahmen bei der Nutzung biologischer Informationsträger;

> Weiterentwicklung von Modellen für Schutz und Nutzung geistigen Eigentums (im Bereich biologischer Forschungsergebnisse und darüber hinaus).

## Grundlagen- und anwendungsbezogene Förderung von Forschung und Entwicklung 2.1

Leitfragen: *Ist die deutsche FuE-Förderung der Synbio ausreichend bzw. verbesserungsfähig? Gibt es spezifische Gründe, warum mehr in die Förderung der Synbio investiert werden sollte?*

Eine detaillierte Untersuchung der bisherigen deutschen Forschungsförderung war nicht Teil des TAB-Projekts. Wichtige Aktivitäten wurden jedoch unter besonderer Berücksichtigung der Begleitforschung und Diskursförderung erfasst und im Vergleich zur Situation in den Niederlanden und dem Vereinigten Königreich dargestellt (Kap. V.2.3 bis V.2.5). Erhebungen zu bzw. Einschätzungen von Synbio-spezifischen FuE-Aktivitäten sind aufgrund der Definitions- und Abgrenzungsfrage grundsätzlich sehr schwierig. Ein markantes Beispiel hierfür bietet die Antwort der damaligen Bundesregierung im März 2011 auf eine Kleine Anfrage der SPD-Fraktion im Deutschen Bundestag, die besagte, »bisher keine Forschungs- und Entwicklungsprojekte spezifisch in der Synthetischen Biologie gefördert« zu haben (Bundesregierung 2011, S. 2) – weil das BMBF den Begriff bis dahin nicht verwendet hatte, obwohl der Strategieprozess Biotechnologie 2020+ praktisch alle typischerweise unter Synthetische Biologie versammelten Forschungs- und Entwicklungsansätze abgedeckt hatte (Sauter 2011, S. 22). Auch bis zum Frühjahr 2015 gibt es keine erkennbare strategische Verwendung des Begriffs durch das BMBF, während die DFG, die MPG und die Helmholtz-Gemeinschaft explizite Synbio-Aktivitäten gestartet haben (Kap. V.2.5).

Auf EU-Ebene, im Vereinigten Königreich und in den USA wurden in den vergangenen Jahren sogenannte »Roadmaps« zur Fortentwicklung der Synbio entwickelt (an der »Strategic Vision« des European Research Area Networks ERA-SynBio war der deutsche Projektträger Jülich intensiv beteiligt; Kap. V.2.5). Sie dienen weniger der Festlegung eines Arbeitsprogramms als vielmehr der Zusammenführung unterschiedlicher Akteure zum gemeinsamen Diskurs über einen komplexen, unübersichtlichen FuE-Bereich. Die übliche Beschreibung von zu erreichenden Forschungszielen auf einer Zeitskala hat daher vorrangig eine kommunikative Funktion: Die jeweils nächsten Forschungsziele sind immer relativ klar (und per Definition vergleichsweise einfach zu erreichen), die mittelfristigen sind schon meist nur mit großen Vorbehalten zeitlich zu prognostizieren, und bei den langfristigen ist (ebenso per Definition) eigentlich unklar, wann und ob sie überhaupt erreicht werden. Die EU-Roadmap »Towards a European Strategy for Synthetic Biology« (TESSY) von 2008 (Gaisser et al. 2009) ist z. B. längst überholt, und auch die mittelfristigen Vorhersagen der britischen Roadmap (UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group 2012), die den Zeitraum von 2015 bis 2020 umfassen, würden heute vermutlich weitere fünf Jahre nach hinten verschoben werden. Auch hier ist das BMBF eher zurückhaltend und verwendet die Bezeichnung Roadmap anscheinend ausschließlich im Kontext der Planung großer Forschungsinfrastrukturen.[207]

Wie umfassend die deutsche Forschungslandschaft und -förderung die verschiedenen Facetten der Synbio insgesamt abdeckt oder ob bestimmte Ansätze in anderen wichtigen Forschungsnationen (wie USA, Vereinigtes Königreich, Schweiz, Niederlanden, Japan, China) stärker gefördert werden, konnte (und sollte) im vorliegenden Bericht nicht untersucht werden. Insgesamt erscheint jedoch

207 www.bmbf.de/pub/Roadmap.pdf (27.11.2015)

der bisherige Verzicht auf die strategische Verwendung des Begriffs sowie zugehöriger Roadmaps und die gleichzeitige vielfältige Förderung neuer Methoden der Bio- und Gentechnologie in unterschiedlichen Förderlinien (u. a. Biotechnologie 2020+, Systembiologie, aber auch über themenorientierte Programme in den Bereichen Gesundheit und Bioökonomie) als passend zu dem Verständnis einer Synbio i. w. S.[208]

Wie in Kapitel III ausführlich und in Kapitel VII.1.2 zusammengefasst dargestellt, resultieren die kurz- und mittelfristigen Anwendungsmöglichkeiten aus der Synbio i. w. S., während das Zukunftspotenzial der Synbio i. e. S. kaum zu prognostizieren ist. Daher ist mit Blick auf das Anwendungspotenzial, aber auch auf mögliche Sicherheitsfragen (Kap. VIII.2.2) festzuhalten, dass im jetzigen Entwicklungsstadium keine substanzielle Begründung erkennbar ist, warum »vollsynthetische« – oder zumindest xenobiologische – Organismen derzeit eine vorrangige Zielstellung der Forschungsförderung über die Grundlagenforschung hinaus, wie sie beispielsweise vom Forschungsnetzwerk »MaxSynBio« (Kap. V.2.5) verfolgt wird, darstellen sollten. Dass solche vom Menschen »designten« biologischen Systeme auf Dauer tatsächlich leistungsfähiger, umweltverträglicher und insgesamt nachhaltiger sein können als lediglich maßvoll bio- bzw. gentechnologisch veränderte Lebewesen, ist rein hypothetisch und wird von vielen Wissenschaftlern ernsthaft angezweifelt. Schon einfache biologische Systeme weisen eine enorme Komplexität auf, die bislang durch Nachbau, aber auch durch Modellierung trotz aller Fortschritte in der Informationstechnologie und Datenverarbeitung noch bei Weitem nicht erreicht worden ist.[209]

Die wichtigste Perspektive der öffentlichen FuE-Förderung sollte das Offenhalten bzw. Erweitern von Optionen sein, was eine zu starke oder vorzeitige Festlegung auf spezielle Technologien oder Verfahren verbietet – insbesondere angesichts einer so großen Herausforderung, wie sie das Erreichen einer globalen, nachhaltigen Bioökonomie darstellt. Ein zweiter Orientierungspunkt für die Entwicklung von gesellschaftlich potenziell umstrittenen Technologien, wie sie die Synbio als nächste Stufe der Bio- und Gentechnologie repräsentiert, wurde in vielen Analysen (bei Weitem nicht nur, aber auch) des TAB gerade im Bereich der Gentechnologie herausgearbeitet und sollte mittlerweile fast selbstverständlich sein, wird aber nach wie vor zu oft ausgeblendet (TAB 2008b, S. 257 ff.): weg von einer isolierten Betrachtung der Technologiepotenziale und hin zu einer umfassenden, problemlösungsorientierten Optionenprüfung. Hierbei wird dann die Beteiligung gesellschaftlicher Akteure außerhalb des Wissenschafts- bzw. klassischen Innovationssystems besonders wichtig, weil diese beispielsweise aus der Landwirtschaft oder der Gesundheitsversorgung Erfahrungs- und Alltagswissen einbringen können, das wissenschaftliche Analysen und Herangehensweisen alleine nicht bieten (Kap. VII.2.3).

## Prospektive Biosicherheitsforschung als Basis zukünftiger Risikoabschätzung und -regulierung 2.2

Leitfragen: *Welches Wissen ist nötig, um eine hinreichend sichere Nutzung von Synbio i. e. S. und i. w. S. zu gewährleisten? Wie und durch wen kann dieses Wissen erlangt werden?*

208 Sollte der Begriff im Lauf der nächsten Jahre doch wieder aus der Mode geraten oder aber auf die Ansätze und Vorhaben der Synbio i. e. S. fokussiert werden, dürfte sich diese Zurückhaltung besonders auszahlen.

209 Diese Fragen wurden durch Gleich und Kollegen ausführlich im Gutachten (Gleich et al. (2012) sowie in weiteren Arbeiten (Giese et al. 2015) diskutiert.

Der sozioökonomische, ökologische oder sonstige gesellschaftliche Nutzen neuer Technologien, ihrer Produkte und Verfahren, muss und kann sich letztlich erst in der Konkurrenz mit den bisher vorhandenen erweisen. Eine Verpflichtung der öffentlichen Hand zur Finanzierung oder zumindest Organisation der prospektiven Abschätzung dieses Nutzens ergibt sich nur dann, wenn ein besonderes öffentliches, aber ein mangelndes privatwirtschaftliches Interesse besteht.

Bei der Risikoabschätzung ist die Situation anders: Hier sollten bzw. dürfen Gefahren nicht erst über reale Schäden an Schutzgütern während der Nutzung der Produkte und Verfahren ermittelt werden, sondern sie müssen – gerade im Umwelt- und Gesundheitsbereich – im Sinn des Vorsorgeprinzips so weit wie möglich prospektiv ermittelt und wenn möglich, durch geeignete Risikomanagementmaßnahmen verhindert werden. Bei komplexen neuen Technologien, zumal wenn mit ihnen große Erwartungen an ein zukünftiges Problemlösungspotenzial verbunden werden und die Grundlagen- und frühe Anwendungsforschung gefördert wird, ist kaum umstritten, dass die Organisation der Risikoforschung eine öffentliche Aufgabe ist, weil einzelne Akteure weder hinsichtlich der Kompetenzen und der Kapazitäten noch hinsichtlich der möglichen gesellschaftlichen Glaubwürdigkeit hierzu in der Lage wären.

Wie in Kapitel IV.1 ausführlich beschrieben, stellt sich für die Synbio, die sehr weitgehend auf der Gentechnologie aufbaut, die Frage, ob die entsprechenden Methoden der Risikoabschätzung und die Verfahren der Risikoregulierung (noch) greifen bzw. ob und wie sie erneuert bzw. erweitert werden können oder müssen. Noch sind sich die meisten internationalen Experten einig, dass die bestehenden Verfahren der Risikobewertung in den nächsten Jahren für den Umgang mit den Produkten der Synbio (i. w. S.) ausreichen, weil die absehbaren Produkte noch sehr ähnlich den bisherigen der Gentechnologie sind (bzw. direkt als solche kategorisiert werden können). Aber gleichzeitig wird seit einigen Jahren schon darauf hingewiesen, dass das bisherige Verfahren, das auf einer Fall-für-Fall-Prüfung und auf einem Vergleich mit weitgehend ähnlichen (substanziell äquivalenten), seit Langem genutzten (vertrauten) Organismen basiert, durch mehrere wissenschaftlich-technologische Entwicklungen der Synbio infrage gestellt wird. Hieraus resultiert die Frage, in welchem Umfang und mit welchen Methoden substanziell veränderte oder weitgehend »neukonstruierte«, vermehrungs- und ausbreitungsfähige Organismen charakterisiert werden können und müssen, um eine gesellschaftlich akzeptable Entscheidungsfindung über die Nutzung dieser Organismen herbeiführen zu können (Kap. IV.1.5).

Unabhängig von der Debatte über Synbio haben sich europäische deutsche Fachbehörden, die EFSA (2011) und das BfN (o. J.), schon seit Längerem mit der Frage befasst, wie GVP mit substanziell geänderten Eigenschaften sicherheitsbewertet werden können, und hierzu Forschungsaufträge vergeben (Greiter et al. o. J.; Halford et al. 2014). Solche substanziellen Änderungen können bei Pflanzen z. B. aus Eingriffen in die stoffliche Zusammensetzung oder die Trockenheits- und Salztoleranz resultieren, weil sich dadurch z. B. das ökologische Ausbreitungsverhalten fundamental verändern kann. Mit Blick auf die fortschreitenden Möglichkeiten der Synbio i. w. S., vor allem der Genome-Editing-Verfahren, erscheint es fast schon drängend, dass sich auch das BMBF – im Verbund mit den anderen betroffenen Fachministerien BMUB und BMEL – erneut der Biosicherheitsforschung zuwendet, nachdem diese seit 2012 nur noch im Rahmen europäischer Projekte gefördert worden ist (BMBF 2014).

Bei den anstehenden Überlegungen zu den Herausforderungen einer prospektiven Biosicherheitsforschung für eine »Risikobewertung ohne Komparator« darf vor allem nicht ausgeblendet werden,

dass es auch bei der »konventionellen« Gentechnologie nach wie vor anhaltende Kontroversen insbesondere mit Bezug auf transgene Pflanzen gibt, ob denn die bisherige Risikoforschung überhaupt hinreichend war bzw. ist, um die Sicherheit einer Freilandnutzung garantieren zu können.

Auf der einen Seite steht der Verweis darauf, dass sowohl die öffentlich finanzierte Biosicherheitsforschung als auch die Daten, die im Rahmen der Zulassungsverfahren für GVP erhoben werden, keine ernsthaften, spezifischen Risiken für Mensch und Umwelt zutage gebracht hätten – zumindest keine größeren, als auch von konventionell gezüchteten Pflanzen ausgehen könnten (BMBF 2014). Auf der anderen Seite steht die Einschätzung, dass diese bisherige Biosicherheitsforschung einen viel zu kleinen Ausschnitt an Fragestellungen viel zu undifferenziert untersucht hat, um eine seriöse Risikoabschätzung vornehmen zu können. Nötig seien ein weitaus umfassenderer Ansatz, der viel differenzierter regionale Unterschiede der aufnehmenden Umwelt in Betracht zieht, sowie die Verbreiterung der beteiligten Fachdisziplinen und die Einbeziehung nichtakademischer Experten (Graef et al. 2012). Dazu kommt die Kritik, dass die Daten, die von den Firmen bei den Zulassungsbehörden eingereicht wurden bzw. werden, völlig unzureichend seien, um eine Risikoabschätzung überhaupt vornehmen zu können. Gentechnikkritische Organisationen monieren in diesem Zusammenhang insbesondere die Besetzung der Gremien in der zuständigen EFSA sowie dem deutschen BVL, deren Mitglieder viel zu enge Verbindungen zur Gentechnikindustrie hätten, um neutrale Einschätzungen vornehmen zu können (Bauer-Panskus/Then 2015; BNN et al. 2015). Doch darüber hinaus wird bei Weitem nicht nur von Gentechnikkritikern, sondern auch von Wissenschaftlern, die einer Nutzung der Gentechnik in der Pflanzenzucht offen gegenüberstehen, bemängelt, dass viele Firmen sich weigern, ihre patentgeschützten Pflanzen für eine neutrale, nichtinteressengebundene Risikoforschung zur Verfügung zu stellen (Waltz 2009).

Wie in Kapitel IV.1.2 beschrieben, kommt zu diesen seit Langem schwelenden Konflikten über die Risikoabschätzung die aktuelle Frage bzw. Sorge, dass eine Reihe von Gentechnologieanwendungen von der Risikoregulierung und damit der Sicherheitsbewertung auch in der EU und Deutschland nicht erfasst wird, weil die quantitativen Änderungen auf DNA-Ebene sehr gering sind, gleichzeitig aber durch Summierung zu substanziell veränderten GVO führen könnten. Und auf politischer Ebene kommen noch die Debatten um die letztliche Ausgestaltung der Opt-out-Regelung für GVP (d. h. der möglichen nationalen GVP-Anbauverbote; Bundesregierung 2015) hinzu, sodass insgesamt seit Frühjahr 2015 Fragen der Zulassung von GVO und der Biosicherheitsforschung als Basis zukünftiger Risikoabschätzung und -regulierung so aktuell und drängend wie schon lange nicht mehr erscheinen.

Um eine forschungspolitische Programmatik für eine *prospektive Biosicherheitsforschung zur Synbio i. w. S.* entwickeln zu können, erscheint es unumgänglich, die bestehenden, ungelösten Kontroversen über die Risikobewertung von GVO ein weiteres Mal aufzurollen und zu versuchen, die Schwachstellen bzw. Streitpunkte der Risikoforschung (als Grundlage zukünftiger Risikoabschätzung und -regulierung) einer umfassenden und vor allem diskursiven Bilanzierung zu unterziehen. Dabei ist nicht zu erwarten, dass die Streitpunkte aufgelöst werden, sondern das Ziel sollte eine weiter gehende Verständigung der unterschiedlichen Akteure als bislang über die (nach wie vor) offenen Fragen der Biosicherheitsforschung zu GVO sein. Die Erfolgschancen könnten am ehesten dadurch erhöht werden, dass die Zielvorgaben so realistisch und konkret wie möglich formuliert werden. Außerdem sollten die Negativerfahrungen der vergangenen Jahre bzw. Jahrzehnte (u. a. der »Diskurs Grüne Gentechnik« des BMVEL 2002) ausgewertet und berücksichtigt werden, bevor ein neuer Versuch gestartet wird.

Die folgenden Einschätzungen zu den Handlungsmöglichkeiten und -erfordernissen für die (deutsche) Forschungspolitik, wenn diese sich des Themas ernsthaft annehmen möchte, basieren auf der langjährigen Befassung des TAB mit der Gentechnologiekontroverse im Allgemeinen und derjenigen zu GVP im Besonderen (TAB 1998, 2000, 2005 u. 2008b). Dabei wird eine Überlegung aufgegriffen, die vor zehn Jahren mit Blick auf die ebenfalls hochkontroverse (Nutzen-)Potenzialabschätzung von neuartigen GVP entwickelt wurde (TAB 2005, S. 258 ff.). Die Idee hinter dem damaligen Vorschlag eines »Fortschrittsberichts der Bundesregierung zum Stand öffentlich finanzierter Aktivitäten im Zusammenhang von Erforschung, Zulassung, Anbau und Vermarktung von GVP« (TAB 2005, S. 261) war, dass es zwar nicht möglich erscheint, einen Konsens zwischen den verschiedenen Meinungsträgern über den Nutzen und die Wünschbarkeit von Gentechnikanwendungen zu erreichen, aber dass es möglich sein sollte, eine Art Bilanz der vorliegenden Forschungsergebnisse zu erarbeiten, die konsensuale und umstrittene Bereiche benennt. Als Ziel wurde definiert, »eine von den verschiedenen Stakeholdern akzeptierbare Basis für eine zukünftige Debatte über die Ausrichtung der Forschungspolitik zu liefern – nicht mehr, aber auch nicht weniger. Um eine möglichst weitreichende Akzeptanz zu erreichen, sind zwei Bedingungen zu erfüllen: Ein solcher Bericht müsste alle zuständigen Stellen und Einrichtungen verpflichtend mit einbeziehen (also zur konstruktiven Kooperation motivieren), und er müsste relevanten interessierten gesellschaftlichen Gruppen für Beiträge offen stehen« (TAB 2005, S. 263).

Fokussiert auf die Biosicherheitsforschung hieße dies, dass keine Einigung über die Sicherheit bzw. die Risiken der GVO an sich erzielt werden soll, sondern lediglich über die Schwachstellen bzw. Streitpunkte der Risikoforschung, um auf dieser Basis Themen und Schwerpunkte für ein Förderprogramm »Prospektive Sicherheitsforschung zu neuartigen FuE-Vorhaben und Produkten der Biotechnologie (ggf. Synbio)« entwickeln zu können. Es war nicht Aufgabe des TAB, eine solche Bewertung der Forschungslage zu GVO/GVP zu versuchen oder gar ein Forschungsprogramm zu entwerfen. Aber es können einige Hinweise zu den Möglichkeiten und Erfordernissen bei der Ausgestaltung des vorgeschalteten Klärungsprozesses und der Forschungsprogrammatik selbst gegeben werden:

- Nach Jahrzehnten heftiger Kontroversen über die Nutzung der Bio- und Gentechnologie muss allen Beteiligten klar sein, dass bei der Risikobewertung von GVO die (natur)wissenschaftlichen Aspekte nur einen Teil der relevanten Fragen abdecken. Ein zukünftiges Biosicherheitsprogramm müsste daher von vornherein sowohl natur- als auch sozial-, geistes-, wirtschafts- und rechtswissenschaftlich ausgerichtet sein, langfristig und ressortübergreifend konzipiert, und dabei echte Beteiligungsmöglichkeiten für die Kompetenz und Interessen aller relevanten gesellschaftlichen Akteure bieten. Die Koordination eines entsprechenden Prozesses zur Erarbeitung eines Forschungsprogramms müsste durch eine Institution bzw. ein (Lenkungs-)Gremium erfolgen, die/das von so vielen Beteiligten wie möglich als neutral und fair eingeschätzt wird.
- Es kann nicht darum gehen, die vorhandenen Einstellungs- und Bewertungsunterschiede aufzulösen. Das konkrete Ziel wäre stattdessen, die wichtigsten offenen Fragen zu definieren und sich gemeinsam darüber zu einigen, welche davon im Rahmen des vorhandenen Budgets z. B. in einer ersten Programmperiode mit welcher Art Forschungsansatz untersucht werden sollen.
- Dabei ist nicht ausgeschlossen, dass auch längst vorhandene Beispiele von GVO herangezogen werden, gerade weil zu ihnen schon Daten vorliegen oder weil z. B. bestimmte Fragen offen geblieben sind.

> Eine Herausforderung wird sein, mit den Extrempositionen umzugehen, die besagen, dass eigentlich alle Fragen zur Biosicherheit von GVO offen oder aber eigentlich alle bereits beantwortet sind (und zwar mit dem Nachweis der Risikolosigkeit). Es müsste vermieden werden, dass die Vertreter dieser Positionen den Prozess blockieren.
> Der Verständigungsprozess bzw. der Entwurf eines Forschungsprogramms muss nicht bei null ansetzen, sondern kann auf die laufenden Aktivitäten zur Risikobewertung von GVP ohne Vergleichsorganismus sowie die in Kapitel IV.1.4 beschriebenen ersten Forschungsagenden bzw. Benennung prioritärer Forschungsbereiche aus der internationalen Synbio-Debatte aufbauen.
> Die zentrale neue Herausforderung, dass für die Sicherheitsbewertung von Synbio-Organismen per Definition nicht mehr einfach vertraute Vergleichsorganismen herangezogen werden können, sondern ein zumindest in bestimmter Hinsicht neuer, unbekannter Organismus komplett hinsichtlich seiner Eigenschaften und seines Umweltverhaltens charakterisiert werden muss, macht die Aufgabe zwar enorm schwer, bietet aber einen gewissen Vorteil für die Verständigung zwischen Gentechnikkritikern bzw. -skeptikern und -befürworten: Es entfällt der fundamentale Streitpunkt, ob die Vertrautheit und Ähnlichkeit so groß sind, dass nur die neue gentechnische Eigenschaft getestet und bewertet werden muss. Dies war von den Kritikern regelmäßig angezweifelt worden.
> Ein absehbarer Konfliktpunkt sind Freisetzungsversuche substanziell veränderter Organismen. In Europa sind diese in den nächsten Jahren aufgrund der restriktiveren Vorgaben gegenüber den USA und einigen anderen Ländern kaum zu erwarten. Allerdings müsste es auch kein Tabu sein, eine internationale Arbeitsteilung bzw. Koordination, die bei einem globalen Thema wie der Biosicherheit ohnehin in vieler Hinsicht notwendig ist, gezielt für besonders umstrittene Bereiche, wie z. B. erste Freisetzungsversuche, zu verabreden. Dies findet durch die unterschiedlichen Regulierungsvorgaben im Bereich der GVO sowieso bereits heute statt und könnte sich auch z. B. aufgrund geeigneterer geografischer bzw. ökosystemarer Gegebenheiten anbieten.
> Zunehmend wichtig dürften Möglichkeiten der Modellierung zur Testung bzw. Vorhersage des Verhaltens neuartiger Organismen in komplexen Umgebungen (bis hin zu natürlichen Ökosystemen) werden. Spätestens bei einer entwickelten Synbio i. e. S. wird es nötig sein, solche Prognosen erstellen zu können, sowohl mit Blick auf den anvisierten Nutzen als auch zur Einschätzung möglicher biologischer Risiken (ähnlich, wie es als Zukunftsszenario in Kap. VI.6 beschrieben wurde). Dafür dürfte es unabdingbar sein, weitaus mehr als heute durch weitere Grundlagenforschung über ökologische Zusammenhänge zu erfahren. Wie leistungsfähig und aussagekräftig solche Modellierungen auf Dauer werden können, ist jedoch nicht sicher einzuschätzen.
> Ein wichtiger Punkt wird die Finanzierung sein. Ob die Privatwirtschaft in Form von Industrieverbänden, Versicherungsunternehmen oder Investorennetzwerken in einen entsprechenden Fonds einzahlen würde bzw. sollte, wäre zu eruieren. Um eine breite Interessen- und Positionenabdeckung zu gewährleisten, wäre es auf jeden Fall nötig, Mitglieder des Vorbereitungs- und Steuerungskreises beispielsweise von vorrangig ehrenamtlich agierenden Umwelt-NRO angemessen zu entschädigen. Dies stellt bislang ein größeres Problem dar (Kap. VII.2.3).

Eine internationale Kooperation in der Biosicherheitsforschung ist fraglos notwendig, entbindet aber nicht von nationalen Aktivitäten – vor allem weil die Sicherheitsfragen so eng mit der gesellschaftlichen Debatte, die auch innerhalb Europas durchaus unterschiedliche Akzente aufweist, verknüpft sind. Eine Auslagerung an internationale Gremien und Interessenvertreter erscheint nicht ausreichend, auch weil dann die jeweils relevanten nationalen Stakeholder nicht ernsthaft beteiligt werden können. Ein erster konkreter Schritt könnte die Organisation einer Sondierungskonferenz

durch die zuständigen Ministerien bereits unter stärkerer Beteiligung der relevanten gesellschaftlichen Gruppen sein.

## Beteiligungsformen und -formate für Stakeholder und die breitere Öffentlichkeit bei der Ausgestaltung von Forschungsagenden 2.3

Leitfragen: *Ist es bei der öffentlichen Förderung zukünftiger Biotechnologien von besonderer Bedeutung, eine Beteiligung von Stakeholdern, darunter die organisierte Zivilgesellschaft, oder auch von nichtorganisierten Bürgern an der Ausgestaltung von Forschungsagenden und -programmen zu ermöglichen? Welche spezifische Unterstützung dieser Akteure wäre dafür nötig, welche Probleme tauchen auf?*

Wie in Kapitel VII.2.2 beschrieben wurde, wäre die Einbindung von Vertretern gerade der kritischen zivilgesellschaftlichen Organisationen bei künftigen Förderprogrammen zur Risiko- bzw. Sicherheitsforschung der Biotechnologie von besonderer Bedeutung. Doch auch im Bereich der nutzen- bzw. optionenorientierten Forschungsförderung ist die Forderung nach Beteiligung gesellschaftlicher Akteure außerhalb des Wissenschaftssystems fast schon Konsens. Auf jeden Fall ist sie ein Maßstab des aktuellen Regierungshandelns. Der Koalitionsvertrag sagt hierzu in Absatz 5.2: »Wir wollen Bürgerinnen und Bürger und die Akteure der Zivilgesellschaft konsequent in die Diskussion um Zukunftsprojekte und die Ausgestaltung von Forschungsagenden einbinden. Wir wollen neue Formen der Bürgerbeteiligung und der Wissenschaftskommunikation entwickeln und in einem Gesamtkonzept zusammenführen.«

Auf EU-Ebene gibt das RRI-Konzept (TAB 2015c) die Orientierung vor, und das Projekt »SYNENERGENE« (Kap. V.2.7) widmet sich der Erforschung und Erprobung unterschiedlicher Kommunikations- und Beteiligungsformate zum Thema Synbio, darunter eine Vielzahl auch in Deutschland. Wie in Kapitel V allerdings anhand verschiedener Beispiele gezeigt wurde, ist es (wenig überraschend) sehr schwierig, mit der breiten Öffentlichkeit in frühen Phasen über Entwicklungen im Forschungsbereich zu debattieren – zumal, wenn schon in der »Scientific Community« keine rechte Einigkeit über das Wesen und die Stoßrichtung einer wissenschaftlichen Entwicklung besteht.

Eine Möglichkeit der Reaktion hierauf ist der in Kapitel V.2.1 kurz vorgestellte Ansatz eines Vision Assessments: Betrachtet und hinsichtlich ihrer hypothetischen sozialen, ökonomischen und ethischen Folgen debattiert werden nicht konkrete FuE-Vorhaben bzw. -Ziele, sondern technologiebasierte, visionäre Zukunftsszenarien, z. B. der Einsatz »vollsynthetischer« Mikroorganismen zur Energieproduktion, in der Medizin oder zur Herstellung von Lifestyleanwendungen (Kosmetika u. Ä.; vgl. auch Kap. VI.6). Dabei geht es nicht so sehr um konkrete Hinweise für die Ausgestaltung von Forschungsagenden oder die Ausrichtung von Forschungsprogrammen, sondern vielmehr um eine Reflexion der heute vorhandenen Einstellungen, Erwartungen und Hoffnungen der Beteiligten (Grunwald 2013). Als begleitende Maßnahme der Forschungsförderung zur stärkeren gesellschaftlichen Reflexion von wissenschaftsbasierten Zukunftsvorstellungen erscheinen entsprechende öffentliche Diskursaktivitäten daher durchaus lohnenswert.

Ein sozusagen gegenteiliger Ansatz (unter weitgehendem Verzicht auf technologische Zukunftsszenarien) ist eine vorrangig nachfrage- bzw. bedürfnis- und problemorientierte Diskussion, die den aktuellen, durch empirisch ermittelte Daten belegten Stand der Synbio und absehbare Anwendungen erfasst. Sowohl die zivilgesellschaftlichen Organisationen (NRO) als auch alle interdisziplinär

oder gesellschaftlich besetzten Beratungsgremien und -einrichtungen (u. a. Rat für Nachhaltige Entwicklung, Sachverständigenrat für Umweltfragen [SRU], Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung [WBGU], die verschiedenen Enquetekommissionen des Deutschen Bundestages, der Deutsche Ethikrat, das Wuppertal-Institut, das Deutsche Biomasseforschungszentrum, der Bioökonomierat) stellen die Problem- und Bedarfsanalyse in den Vordergrund und versuchen dann die Anforderungen an organisatorische, politische, soziale und technologische Handlungsmöglichkeiten sowie daraus resultierenden Forschungsbedarf zu beschreiben. Dieses Vorgehen prägt mittlerweile auch sehr deutlich die großen Forschungsprogrammatiken der Bundesministerien, u. a. die neue Hightech-Strategie oder die Forschungsagenda »Green Economy«. Da die Synbio (i. e. S.) noch sehr weit von einer Nutzbarkeit entfernt ist, wundert es nicht, dass sie bisher in den Analysen und Stellungnahmen beispielsweise zu den Perspektiven der globalen Landnutzung oder zur Bioökonomie keine Rolle gespielt hat.

Während es für die großen Wissenschaftsorganisationen und -einrichtungen, darunter die Akademien, aber auch die großen gesellschaftlichen Akteure wie Gewerkschaften und Kirchen sowie die Privatwirtschaft meist problemlos möglich ist, eine personelle und fachliche Begleitung von bzw. Beteiligung an der Entwicklung von Forschungsprogrammatiken zu organisieren, fällt dies den zivilgesellschaftlichen Organisationen aus dem Umwelt-, Entwicklungs- oder Sozialbereich deutlich schwerer, weil sie häufig nur wenige bezahlte Mitarbeiter haben, deren Arbeit zum großen Teil aus Mitgliedsbeiträgen finanziert wird. Es ist daher seit Längerem eine verständliche Forderung, dass Fördermittel nicht nur sporadisch, sondern mit längerfristiger Zusage für eine organisierte Teilhabe von NRO-Vertretern durch die Forschungspolitik zur Verfügung gestellt werden (Forschungswende 2014; Ober 2014; Veciana/Neubauer 2014).

Als Voraussetzung für eine stärkere Einbindung gesellschaftlicher Akteure in Fragen der Forschungsprogrammatik, aber auch für die weitere Verarbeitung der Ergebnisse entsprechender Diskursaktivitäten ist eine fundierte, reflektierende Berichterstattung in den Massenmedien unabdingbar. In Anbetracht der vielfältigen aktuellen Probleme des Wissenschaftsjournalismus erscheint die Förderung der personellen Ausstattung, der Professionalität und Qualität des Wissenschaftsjournalismus als Aufgabe nicht allein der Medien, sondern auch der Politik erwägenswert (Leopoldina et al. 2014).

Für die Beteiligung von Einzelpersonen, also nichtorganisierten Bürgern, bietet sich zum Bereich der Synbio i. e. S. über die bereits genannte Teilnahme an öffentlichen Zukunftsdebatten hinaus aktuell kein erkennbarer Ansatzpunkt. Aber mit Blick auf die Synbio i. w. S. könnten in den kommenden Jahren die im folgenden Kapitel behandelten Ansätze der Citizen Science in Form der DIY-Biologie zunehmend attraktiver werden.

## Potenziale, Perspektiven und Voraussetzungen einer aktiven Teilhabe von Bürgern an biotechnologischer Forschung in Form von Citizen Science/DIY-BIO2.4

Leitfragen: *Welche Rolle können oder sollen »Bürger« bzw. nichtprofessionelle Akteure bei der Weiterentwicklung und Nutzung biotechnologischer Methoden spielen? Wie passen die bisherigen und geplanten Aktivitäten (u. a. des BMBF) zur öffentlichen Förderung von Citizen Science zu den Aktivitäten einer zunehmend selbstbewussten und leistungsfähigen DIY-Biologie?*

Die aktive Teilnahme von Nichtwissenschaftlern an Forschungsprojekten wird seit einigen Jahren unter dem Begriff Citizen Science verstärkt von der Politik gefördert. Das BMBF hat 2014 die Internetplattform »buergerschaffenwissen.de« ins Leben gerufen, die als zentrale Anlaufstelle für Projekte der Bürgerforschung in Deutschland dienen soll.[210] Hierbei dominieren bislang Vorhaben, bei denen die Bürger vorrangig an der Datenerhebung beteiligt sind, beispielsweise bei Tierartenzählprojekten oder astronomischen Beobachtungen – also eine Art »Wissenschaft *mit* Bürgern« (Kasten VI.2 in Kap. VI.3.1).

Die DIY-Biologie (Kap. VI) hingegen steht für eine »Wissenschaft *durch* Bürger«, wobei sich aus der Perspektive der akademischen Wissenschaft die Frage stellt, ob bzw. welche DIY-Aktivitäten wirklich als Wissenschafts- bzw. Forschungsprojekte bezeichnet werden können bzw. sollen. Die DIY-Bioszene selbst interessiert die Antwort auf diese Frage allerdings wenig, ihr geht es um eine aktive Wissensaneignung, um Experimentieren und Ausprobieren jenseits von Top-down-Mitmachveranstaltungen, Tagen der offenen Tür oder langen Nächten der Wissenschaft in Forschungseinrichtungen oder Science Centern. Wie in Kapitel VI dargestellt, handelt es sich um eine sehr heterogene Szene, die sich neben interessierten Laien und Bastlern insbesondere aus bildenden Künstlern sowie wissenschaftlich ausgebildeten Akteuren (mit Schwerpunkt aus den Bio- und Informationswissenschaften) rekrutiert. Diese verfolgen durchaus unterschiedliche Ziele, die von reinem Hobby über einen demokratietheoretisch fundierten Teilhabeanspruch (an dem Wissensfortschritt und der Debatte in den Biowissenschaften) bis hin zur Entwicklung möglicher Geschäftsideen reichen.

Die Bedeutung der DIY-Bio- oder Biohackerbewegung für die Synbio resultiert bislang weniger aus der Entwicklung innovativer Projektideen oder gar konkreter Forschungsvorhaben, da die technischen Kapazitäten und Möglichkeiten meist noch sehr begrenzt sind. Es waren und sind vielmehr die zukünftigen Möglichkeiten einer DIY-Bioszene, die aus einer fortentwickelten Synbio resultieren könnten, welche von den Medien sowie der Begleitforschung und vor allem in den USA von den Sicherheitsbehörden als relevant und häufig auch als besorgniserregend eingeschätzt wurden (Kap. VI.4.3). Daher werden immer wieder Stimmen laut, welche die DIY-Biologie aufgrund von Sicherheitsbedenken als nicht erwünschte Form der Citizen Science einordnen, auch wenn die Bedenken vor allem zu möglichen Biocrime- oder gar Bioterrorpotenzialen von den meisten Experten als übertrieben eingeschätzt werden (Kap. VI.4.4).

Skepsis gegenüber einer DIY-Biologie, die sich der Bio- und Gentechnologie zuwendet, wurde auch in der deutschen Debatte aus der etablierten Wissenschaft geäußert. Dies steht in gewissem Kontrast zu dem gleichzeitig seit Langem vernehmbaren Ruf insbesondere aus der Wissenschaft nach größerer Offenheit bzw. Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber den Anwendungen und Produkten der Gentechnik. Allerdings zeigte sich gerade in jüngster Vergangenheit bei öffentlichen Veranstaltungen zu den Perspektiven der Synbio zumindest eine wachsende Diskussionsbereitschaft von akademischen Forschern mit Vertretern der Biohackerszene.[211] Zum Teil ist die DIY-Biologie außerdem bereits in Projekte der Begleitforschung eingebunden, z. B. bei »SYNENERGENE« (Kap. V.2.7). In diesem tragen DIY-Biologen mit Workshops und Diskussionsveranstaltungen zur Verbreitung

210 www.bmbf.de/de/23672.php (27.11.2015)

211 Beispielsweise auf dem Symposium »Evolution in Menschenhand? Synthetische Biologie aus Labor und Atelier« von BBAW, Leopoldina und Schering-Stiftung am 13.3.2015 oder bei der Auftaktveranstaltung des Forschungsnetzwerks »MaxsynBio« der MPG am 16.4.2015.

der öffentlichen Debatte über die Synbio bei und entwickeln ihre Formate öffentlicher (Bürger-)Wissenschaft weiter.

Für die Forschungspolitik stellt sich die Frage, ob zu einer umfassenden Beteiligung der Gesellschaft am wissenschaftlichen Fortschritt – im Sinn einer gemeinsam verantworteten Forschung- und Innovationsförderung (RRI) – in der Biotechnologie bzw. der Synbio i. w. S. nicht auch die gezielte Unterstützung von Biohackerspaces gehören sollte, so wie es z. B. in Frankreich oder den USA in gewissem Umfang erfolgt ist. Erkundet werden könnte auch die Entwicklung von »Bürgerlaboren«, die an Universitäts- oder sonstige Forschungsinstitute angegliedert werden. Dabei müsste allerdings gewährleistet sein, dass diese über Kommunikations- bzw. Bildungsmaßnahmen wie die bestehenden »gläsernen Labore« u. Ä. hinausgehen und ganz explizit Platz für eigene Ideen nichtprofessioneller Akteure geschaffen wird. Ein entscheidender Punkt dabei wäre – wie so oft – die Frage der Finanzierung dieser Bürgerlabore, aber auch der zeitlichen Möglichkeiten von angestellten Wissenschaftlern aus den »gastgebenden« Instituten, sich ohne Erfolgs- und Publikationsdruck einem offenen Austausch und dem Experimentieren mit den »Bürgerforschern« widmen zu können.

Einzelheiten solcher Modelle können an dieser Stelle nicht diskutiert werden. Ganz wichtig wäre es, die vorhandene Biohackerszene und potenziell zu beteiligende Institutionen und Akteure von vornherein substanziell an der Entwicklung zu beteiligen. Dabei ist evident, dass ein gewisses Spannungsfeld zwischen dem Wunsch nach weitgehender Selbstbestimmung und gleichzeitig öffentlicher Förderung und Finanzierung besteht. Es kann sicherlich nicht um eine schlagartige flächendeckende Unterstützung von Biohackerspaces und Einrichtung von »Bürgerlaboren« gehen, sondern zunächst um ein Erproben mehrerer Varianten über einen nicht zu kurzen Zeitraum, der die Entwicklung und Umsetzung von DIY-Projekten realistischerweise ermöglicht.

Möglichkeiten des Missbrauchs, vor allem aber der unbeabsichtigten Gefährdung müssen bei der Unterstützung der DIY-Biologie selbstverständlich mit bedacht werden. Das gemeinsame Agieren an öffentlichen Orten bzw. in offenen, transparenten Gruppen sollte dabei der beste Garant gegen unentdeckte gefährliche Machenschaften bzw. die Abdrängung von Interessierten in die Illegalität sein. Gefördert werden sollte auch der Austausch der DIY-Biologen untereinander sowie mit der Öffentlichkeit über Fragen der gemeinsamen gesellschaftlichen und ethischen Verantwortung und Verpflichtung – die nicht nur an professionelle Biosicherheitsbeauftragte oder Ethikgremien delegiert werden sollten.

Gerade mit Blick auf zukünftige weit reichendere und leichtere Zugangsmöglichkeiten zu Information und Technologie ist es wünschenswert, dass Hackerspaces und Bürgerlabore offene Orte des Austauschs und der Diskussion bleiben, die selbstverständlich die herrschenden Biosicherheitsregularien einhalten müssen. Deren maßvolle Weiterentwicklung durch eine geringfügige Reduktion der Anforderungen an die Sachkunde bzw. Berufserfahrung des Betreibers, die Festlegung einer S-½-Sicherheitsstufe oder einer Selbstklonierungswhitelist (Kap. V.7.3) könnten in diesem Zusammenhang geprüft werden. Fortbildungsangebote auch für bereits biologisch ausgebildete Biohacker im Bereich der Laborsicherheit sollten grundsätzlich zum Standard werden.

## Dual-Use-Fragen zu biologischen Gefahren: Selbstverpflichtungen und Kontrollmassnahmen 2.5

Leitfragen: *Ergeben sich aus den Fortschritten der Biowissenschaften und speziell den unter Synbio (i. e. S. und/oder i. w. S.) zusammengefassten Entwicklungen neuartige Gefahren des Missbrauchs? Und wie kann diesen begegnet werden?*

Molekularbiologie und Genomforschung haben Wissen über Molekül-, vor allem DNA-Strukturen von höchstgefährlichen Krankheitserregern oder für die Herstellung von Giftstoffen hervorgebracht. Nicht die speziell unter Synbio (i. e. S. und/oder i. w. S.) zusammengefassten Methoden und Forschungsansätze haben in den vergangenen Jahren Anlass zur Besorgnis geliefert, sondern vor allem medizinisch und epidemiologisch motivierte Arbeiten mit hochpathogenen Viren haben das Thema Dual-Use-Forschung international wie national auf die forschungs- und sicherheitspolitische Agenda gebracht (Kap. IV.2.1). Dabei geht es sowohl um den Umgang mit existierendem Wissen (bzw. dessen Geheimhaltung) als auch um die Frage nach einem Verzicht auf bzw. Verbot von Untersuchungen, die dieses Wissen erst hervorbringen.

Gerade in Deutschland wurde die Dual-Use-Problematik in den vergangenen Jahren mit Blick auf besorgniserregende biosicherheitsrelevante Forschungsvorhaben (DURC) von Wissenschaft und Politik intensiv diskutiert (Kap. IV.2.4). Die DFG (2013) publizierte im Jahr 2008 einen »Verhaltenscodex: Arbeit mit hochpathogenen Mikroorganismen und Toxinen«, die MPG positionierte sich 2010 bereichsübergreifend zur Dual-Use-Problematik in ihren »Hinweisen und Regeln zum verantwortlichen Umgang mit Forschungsfreiheit und Forschungsrisiken« (MPG 2010). 2012 wurde das Thema dann intensiv im Forschungsausschuss des Bundestages diskutiert, die Leibniz-Gemeinschaft (2012) legte ebenfalls einen Verhaltenskodex zum Thema Biosicherheit vor, und die Bundesregierung beauftragte den Deutschen Ethikrat mit der Erarbeitung einer Stellungnahme. Dessen Stellungnahme »Biosicherheit – Freiheit und Verantwortung in der Wissenschaft« (DER 2014) bzw. die darin enthaltene Forderung nach einer gesetzlichen Regelung für DURC bildet den aktuellen Referenzpunkt für die politische Behandlung des Themas in Deutschland.

Kernpunkte der Empfehlungen des Deutschen Ethikrates sind die Erstellung eines bundesweit, d. h. für alle Arten von öffentlichen und privaten Forschungseinrichtungen gültigen Forschungskodexes für einen verantwortlichen Umgang mit Biosecurityfragen sowie die Einrichtung einer zentralen, interdisziplinär zusammengesetzten Kommission, die alle Forscher vor der Durchführung von DURC-Projekten informieren müssen. Um eine Kultur der Verantwortung zu fördern, wird die Implementierung von Biosecurityfragen in die Curricula für Studierende und Doktoranden sowie in Ausbildungsordnungen im Bereich der relevanten Wissenschaften empfohlen. Gefördert werden sollen außerdem öffentliche Diskurse zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit, weil die Abwägung und Bewertung des Nutzens gegenüber dem möglichen Risiko von DURC-Projekten keine rein wissenschaftliche, sondern ein gesamtgesellschaftliche Aufgabe ist.

Eine explizite rechtliche Regulierung im Sinne verpflichtender Kontroll- und Beratungsverfahren für DURC wird von DFG und Leopoldina bislang abgelehnt, aber es wurde ein ständiger »Gemeinsamer Ausschuss zum Umgang mit Sicherheitsrelevanter Forschung« eingerichtet, der alle deutschen Forschungseinrichtungen dabei unterstützen soll, (wenn möglich bis 2017) Kommissionen für Ethik der Forschung als fachübergreifende Anlaufstellen vor Ort zu etablieren.

Aus einer interdisziplinären Perspektive erscheint es geradezu notwendig, die Dual-Use-Problematik nicht auf die Biowissenschaften zu begrenzen, aber es stellt sich einerseits die Frage nach der Kompetenz des Gremiums zur Einschätzung spezifischer Missbrauchsmöglichkeiten und andererseits danach, ob freiwillige Selbstverpflichtungen in allen Feldern ausreichen. Der Deutsche Ethikrat befürwortet die gesetzliche Verankerung einer entscheidungsfähigen DURC-Kommission, weil insbesondere eine mögliche gezielte, ausnahmsweise Beschränkung der Forschungsfreiheit als fundamentales Grundrecht einer sehr starken Legitimation bedürfte.

Grundsätzlich spricht alles für eine deutlich stärkere Förderung der Bewusstseinsbildung für Missbrauchsmöglichkeiten insbesondere in Universitäten, nachdem das Thema Dual Use in den Curricula der Biowissenschaften kaum behandelt wird. Von verschiedener Seite wurde in den letzten Jahren darauf hingewiesen, dass die immer kürzere Befristung der Verträge in Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen auch in diesem Kontext ein fundamentales Problem darstellt, weil dadurch zum einen die Bindung der Forschenden an die jeweilige Einrichtung (und damit ihre jeweiligen Verhaltenskodizes) nicht stark ausgeprägt wird und weil dadurch zum anderen der Erfolgs- bzw. Publikationsdruck steigt, was dazu führen kann, dass möglichen Bedenken weniger Raum gegeben wird, da den einzelnen Wissenschaftlern schlicht die Zeit fehlt, sich mit ethischen Fragen der eigenen Forschung intensiver zu befassen.

Mit Blick auf die konkreten Missbrauchsgefahren einer künftig deutlich leistungsstärkeren, billigeren und dezentralen Gen(om)synthese – als zentrale Voraussetzung, aber auch erwartbare weitere Entwicklung der Synbio – zeigt sich eine fast schon überraschende Konvergenz der Forderungen nach zukünftigen Sicherheitsmaßnahmen: Auf der einen Seite hat Christof Potthof vom gentechnikkritischen GeN auf der Anhörung des Deutschen Ethikrates eine Meldepflicht für »gensynthetisierende« Einrichtungen sowie eine Registrierung von DNA-Synthesizern gefordert (DER 2013, S. 41), und auf der anderen Seite zielen auch die Überlegungen zur Zukunft der DIY-Biologie von Rüdiger Trojok ganz explizit auf eine umfassende (Online-)Beobachtung der Herstellung und Nutzung von Gensequenzen (Kap. VI.6.2). Wie eine solche Erfassung sowie mögliche Interventionen als Reaktion auf besorgniserregende Beobachtungen praktisch organisiert werden können, ist allerdings weitestgehend unklar. Theoretisch müssten entsprechende Maßnahmen und Verfahren im Konsens global und flächendeckend eingeführt werden, sie müssten finanzierbar sein und dürften den Forschungs- und Entwicklungswettbewerb in Wissenschaft und Industrie nicht unnötig behindern bzw. gar unmöglich machen.

Die zugrundeliegenden Szenarien einer dezentralen, leistungsfähigen Gensynthese (Szenario Home-DNA-Synthesizer für den Hausgebrauch: »Ich drucke mir meinen Lieblings/mikro/organismus und gucke mal, was der kann.«) erscheinen heute noch visionär. Angesichts der raschen technischen Weiterentwicklung sowie des allgegenwärtigen digitalen Wandels einschließlich damit verbundener grundlegender sozialer und ökonomischer Veränderungen spricht jedoch alles dafür, sich auch mit scheinbar utopischen Möglichkeiten und eventuell nötigen und möglichen Sicherheitsmaßnahmen zu befassen. Hierfür können die Visionen der DIY-Bioszene eine wichtige Quelle darstellen. Der Austausch zwischen etablierter Wissenschaft, Biohackern und der weiteren Gesellschaft sollte dabei auf einer Kultur der Offenheit, Transparenz und Verantwortung basieren. Eine vorrangige Überwachung durch die Sicherheitsbehörden bzw. Geheimdienste (wie in den USA) erscheint hingegen wenig angemessen angesichts einer als gering anzusehenden bisherigen Gefahrenlage – und längerfristig sogar kontraproduktiv, falls sich Biohacker kriminalisiert fühlen und ihre Aktivitäten bewusst verstecken würden.

## Nachhaltige Modelle für Schutz und Nutzung geistigen Eigentums 2.6

Leitfragen: *Wie kann gewährleistet werden, dass der enorme – bereits vorhandene, vor allem aber der zu erwartende – Wissenszuwachs in den Biowissenschaften möglichst nachhaltig, d. h. sozial gerecht, ökologisch verträglich und ökonomisch langfristig ertragreich genutzt wird? Anders formuliert: Wie kann eine ungute Machtfülle einzelner Akteure sowie die Marginalisierung alternativer Wissens- und Handlungsoptionen verhindert werden? Welche (transnationalen) Akteure und Gremien haben hier realistische Gestaltungsmöglichkeiten?*

Die Frage, wie geistiges Eigentum, das von den modernen Biowissenschaften hervorgebracht wird, geschützt werden kann und soll, ist eine der am heftigst umstrittenen in der Gentechnologiedebatte, aus ökonomischen und ethischen Gründen. Es wurde zwar z. B. in der EU ein eigenes Biopatentrecht geschaffen, dessen Anwendbarkeit und Auslegung ist aber nach wie vor heiß umkämpft. Regelmäßig werden Patentansprüche gerichtlich angefochten, sowohl von Mitbewerbern als auch von patentkritischen Organisationen.

Doch bei Weitem nicht nur in den Biowissenschaften wird die Frage gestellt, ob ein starker Patentschutz gesellschaftlich wünschenswert ist bzw. welche ökonomischen und sozialen Folgen, national wie international, von ihm ausgehen: Sind Patente tatsächlich innovationsfördernd, weil sie erst die Offenlegung des Wissens ermöglichen und FuE-Investitionen absichern? Oder behindern sie eher Folgeinnovationen und werden de facto (zu) oft zur Abwehr lästiger Konkurrenz eingesetzt? Zementieren sie das sozioökonomische Gefälle zwischen Nationen und Weltregionen, oder müssten die Regelungen nur angemessen politisch angepasst bzw. interpretiert werden?

Die äußerst unübersichtliche Daten- und Debattenlage konnte im Rahmen des TAB-Projekts nicht aufgearbeitet werden,[212] sie wurde lediglich im Kontext der Betrachtung der DIY-Bioszene, ihrer Zielsetzungen und Visionen (in Kap. VI.5.2 u. VI.6) angerissen. Dabei wurde deutlich, dass zumindest für die nichtkommerzialisierte DIY-Biologie nicht nur der offene Zugang zu biologischen Informationen und Technologien (im Sinn von Open Access), sondern eine Nutzungsfreigabe auf der Basis von Creative-Commons-Lizenzen (im Sinn von Open Source) angestrebt wird. Die in Kapitel VI.6.3 umrissene Bio-Commons-Vision soll eine möglichst sozialgerechte Nutzung ermöglichen und gleichzeitig durch maximale Transparenz auch eine gemeinwohlorientierte Kontrolle und Sicherheitsarchitektur beim Umgang mit einer künftigen Synbio bieten.

Auch wenn sowohl Open Access als auch Open Source als Konzepte oft eng mit Vorstellungen zur Etablierung der Synbio verknüpft sind, gibt es eine viel längere Tradition entsprechender Bemühungen gerade aus dem Kontext der öffentlich geförderten Genom- und Proteomforschungsprojekte heraus (Kap. VI.5.2). Die Neuheit besteht eher darin, dass neben dem (mit all seinen Kontroversen und Fallstricken) etablierten (Bio-)Patentrecht zunehmend das Urheberrecht als künftiges Schutz- und Nutzungskonzept diskutiert wird – entsprechend der Annahme, dass die Zukunft der Synbio dahingeht, dass eine Gestaltung von biologischer Information (v. a. der DNA, darüber dann auch sons-

212 Die Kompliziertheit der Materie ist vermutlich die Ursache, dass Fragen des geistigen Eigentum zwar in praktisch allen Berichten und Stellungnahmen zur Synbio (Kap. II.2 u. V.2) angesprochen – aber meist genauso wenig wie im vorliegenden Bericht vertieft behandelt werden.

tiger Moleküle bzw. Eigenschaften synthetischer Systeme) ähnlich dem Programmieren von Softwarecodes erfolgt. Ein Bedeutungszuwachs des Copyrights ist bereits jetzt in anderen Technologiebereichen unübersehbar, beispielsweise beim 3-D-Druck (TAB 2014b).

Mit Blick auf zukünftige, i. e. S. »designte« Molekülstrukturen, Gene oder gar Organismen wäre zu bedenken, dass für diese eine gewerbliche Unterschutzstellung viel plausibler sein wird als für vorrangig analytischer Ergebnisse in Form natürlich vorkommender DNA-Sequenzen (weshalb die Patentierung z. B. humaner Gensequenzen höchst umstritten war und ist, auch wenn diese streng genommen nicht als Sequenz, sondern meist hinsichtlich ihrer Anwendung im Rahmen einer technischen Nutzung, z. B. eines Gentests oder eines Produktionsverfahrens für Arzneimittel oder Pflanzensorten beantragt wurde).

Für die Forschungspolitik stellt sich die Frage, ob die Vergabe von Fördergeldern mit einer Vorgabe für die Zugangs- und Nutzungsbedingungen der Ergebnisse verknüpft werden kann bzw. soll. Diese Frage wird seit Jahren in Wissenschaft und Politik weit über den Bereich der Biowissenschaften hinaus intensiv diskutiert, eine Pauschalantwort hierauf wäre unangemessen.

Differenzierte Antworten waren im vorliegenden Rahmen nicht möglich, aber es ist evident, dass der *Umgang mit geistigem Eigentum unter den Bedingungen einer zunehmend digitalen Ökonomie* eines der ganz großen Themen für die Wissenschaft sowie die Forschungs- und Wirtschaftspolitik in den nächsten Jahren bleiben wird. Die Entwicklung von wissenschaftlich, ökonomisch, sozial, politisch und rechtlich realistischen, innovativen Regelungsmodellen wäre eine sehr herausfordernde, aufwendige Aufgabe für eine vertiefende Technikfolgenabschätzung. Dabei müssen sowohl sehr unterschiedliche Wissenschafts- und Wirtschaftsbereiche, die teils sehr unübersichtliche Rechts- und Faktenlage und die Rolle der unterschiedlichen Akteure und Gremien in Wirtschaft, Gesellschaft und Politik berücksichtigt werden, um zu realitätsnahen, umsetzbaren Vorschlägen zu kommen.

## Schlussbetrachtung: Zur Rolle der Synbio in der absehbaren neuen Runde der Gentechnikdebatte 3.

In den Jahren von 2011 bis 2014, in denen die Entwicklungen der Synbio durch das TAB beobachtet und ausgewertet wurden, hat sich zwar einiges im Forschungsbereich getan, aber die Perspektiven und Potenziale der Synbio i. e. S. – also der Herstellung von »am Reißbrett« entworfenen und de novo konstruierten Zellen oder Organismen – sind auch bis zum Frühjahr 2015 nicht viel konkreter geworden, sondern haben nach wie vor den Status einer Zukunftsvision. Die größere wissenschaftliche und praktische Bedeutung haben demgegenüber die Fortschritte im Bereich der (in diesem Bericht sogenannten) Synbio i. w. S., d. h. einer zunehmend informationsbasierten molekularen Veränderung bekannter Organismen durch die Integration neuer Synthesewege zur Herstellung von Chemikalien oder genetischer Schaltkreise für neue sensorische und regulatorische Funktionen. Da die angestrebten neuen Verfahren, Anwendungen und Produkte in den meisten Fällen einer Fortschreibung von seit Längerem verfolgten bio- und gentechnologischen Strategien entsprechen, erschien es wenig plausibel, dass sich grundsätzlich neuartige sozioökonomische oder ethische Fragen ergeben.

Der größte Neuigkeitswert der Synbio besteht daher in der Erweiterung der beteiligten Akteurskreise innerhalb und außerhalb der Wissenschaft bzw. des bisherigen biowissenschaftlich basierten Innovationssystems. Eine markante Entwicklung findet in der DIY-Biologie als Form der Citizen Science statt, außerdem ist die Synbio Thema bzw. Experimentierfeld vielfältiger Begleitforschungs- und Diskursaktivitäten, die eine neue, gesellschaftlich breit getragene Governance dieses Forschungs- und Entwicklungsfeldes zum Ziel hat (Stichwort RRI). Von beiden Entwicklungen, die im vorliegenden Bericht ausführlich dargestellt wurden, kann eine gewisse Belebung bzw. Öffnung der Gentechnikdebatte erwartet werden, weil viele der neuen Akteure sich nicht so sehr an den weitverbreiteten, oft starren Pro- und Kontrapositionen der traditionellen Meinungsträger aus Wissenschaft, Wirtschaft, NRO und Politik orientieren, sondern die Anwendung neuer Biotechnologien als Gestaltungs- und Beteiligungsaufgabe für einen breiten Kreis von Bürgern ansehen. Bei der Einschätzung der Bedeutung dieser Entwicklungen darf allerdings nicht übersehen werden, dass sowohl das Engagement der DIY-Bioszene als auch die Diskursaktivitäten der Begleitforschung zur Synbio in der breiten Bevölkerung noch keinen wirklich großen Bekanntheitsgrad erlangt haben.

Was das eigentliche Thema Synbio anbelangt, hat sich diese Bilanz auch im Frühjahr 2015 nicht wesentlich geändert. Aber die Diskussion über die neuen Möglichkeiten und Konsequenzen der Genome-Editing-Verfahren – die bis vor Kurzem meist nicht unter dem Label Synbio behandelt worden waren – hat sich in den letzten Wochen der Berichtsfertigstellung so ausgebreitet und intensiviert, dass von einer grundlegenden Veränderung der Debattenlage über die Weiterentwicklung und -nutzung von Genmanipulationstechniken auszugehen ist. Diese wird sich voraussichtlich sehr stark um Fragen der Regulierung und damit der Risiken drehen. Dabei richtet sich die größte öffentliche Besorgnis verständlicherweise auf mögliche Anwendungen beim Menschen. Aber es ist auch absehbar, dass die Konsequenzen der Genome-Editing-Verfahren bei Pflanzen auf das Risikoregulierungsregime Anlass für eine sehr grundsätzliche Wiederaufnahme der Debatte über die Definition, Sicherheit und die Risikoabschätzung von GVP sein werden. Ob in diesem Zusammenhang das in den letzten Jahren entwickelte und derzeit in Umsetzung befindliche Opt-out-Verfahren für die Zulassung von GVP, das eine Art pragmatische Kompromisslösung für die seit vielen Jahren festgefahrene Situation bieten sollte, Bestand haben wird, muss sich zeigen.

Was darüber hinaus fraglos erscheint, ist, dass das Problem einer Sicherheitsbewertung bzw. Risikoabschätzung ohne substanziell ähnlichen, vertrauten Vergleichsorganismus – das sich auch in der Synbio-Debatte als kommende zentrale Herausforderung ergeben hatte – eine viel höhere Dringlichkeit erhält, wenn die Genome-Editing-Verfahren in der kommenden Zeit weltweit zur extensiven Veränderung von Genomen angewendet werden. Insofern dürfte eine Intensivierung der Biosicherheitsforschung unumgänglich sein, sowohl national als auch über internationale Kooperationen.

Neben vielfältigen Eingriffen bei Pflanzen dürften auch die Anwendungen bei Tieren massiv ausgedehnt werden. Auch hier hatten in der Vergangenheit die geringeren Erfolgsraten eine gewisse Hürde dargestellt, die nun durch die größere Einfachheit und Geschwindigkeit, mit der zielgerichtet und präzise Genomveränderungen vorgenommen werden könnten, überwunden werden können. Und selbst dann, wenn mithilfe der Genome-Editing-Verfahren gar nicht so sehr stärker veränderte, sondern lediglich in schnellerer Abfolge veränderte Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen erzeugt werden: Zu all diesen GVO müssen seriöse Risikoabschätzungen vorgenommen werden, was die Zulassungsgremien und Regulierungsbehörden vor massive Kapazitätsprobleme stellen würde.

Das globale Ausmaß und die Folgen dieser Entwicklung sind insgesamt kaum abzusehen. Aber klar erscheint, dass sich in den kommenden Jahren nicht nur für die Forschungspolitik, sondern voraussichtlich auch für den Deutschen Bundestag als Gesetzgeber viele neue, zum Teil auch nur erneute Fragen zur Förderung, zur sozioökonomischen und ethischen Bewertung sowie zur Regulierung der Anwendungen der Gentechnologie ergeben werden, bei denen es letztlich keine große Rolle spielt, ob die Technologien und Verfahren als Synthetische Biologie bezeichnet werden. Neu ist daran auch die gewachsene Bedeutung der internationalen Dimension der Fragen (bzw. entsprechender Antworten/Lösungsansätze), die sich nicht zuletzt aus der gewachsenen und weiter zunehmenden wissenschaftlichen und technologischen Kapazität der Schwellenländer ergibt. Ein kontinuierliches Monitoring der globalen Entwicklungen unter Nutzung wissenschaftlich valider Indikatoren und eine regelmäßige Berichterstattung erscheinen daher naheliegend.

# LITERATUR

## IN AUFTRAG GEGEBENE GUTACHTEN 1.


Engelhard, M., Hagen, K. (2012): Bedeutung der Grenzüberschreitung zwischen Disziplinen und Akteuren in der Synthetischen Biologie. Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler gGmbH, Bad Neuenahr-Ahrweiler

Gleich, A. von, Giese, B., Köngstein, S., Schmidt, J.C. (2012): Charakterisierung der Synthetischen Biologie einschließlich einer Darstellung möglicher Entwicklungsperspektiven und gesellschaftlicher Einflussmöglichkeiten. aforetec GbR, Bremen


## KURZEXPERTISEN UND KOMMENTARE 2.


Potthof, C. (2013): SynBio & DIY unter besonderer Berücksichtigung der zivilgesellschaftlichen Teilhabe und neuer Sicherheitsfragen. Kommentargutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Gen-ethisches Netzwerk e.V., Berlin

Trojok, R. (2012): DIYbio und Citizen Science. Eine Beurteilung im Kontext der Synthetischen Biologie. Expertise für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Kopenhagen

Trojok, R. (2014): Schlüsselereignisse in der Synthetischen Biologie. Expertise für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin


## WEITERE LITERATUR 3.


acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.) (Hg.) (2012): Perspektiven der Biotechnologie-Kommunikation. Kontroversen – Randbedingungen – Formate. acatech POSITION, Heidelberg

Adam, L., Kozar, M., Letort, G., Mirat, O., Srivastava, A., Stewart, T., Wilson, M.L., Peccoud, J. (2011): Strengths and limitations of the federal guidance on synthetic DNA. In: Nature Biotechnology 29(3), S. 208–210

Ajikumar, P.K., Xiao, W.-H., Tyo, K.E., Wang, Y., Simeon, F., Leonard, E., Mucha, O., Phon, T.H., Pfeifer, B., Stephanopoulos, G. (2010): Isoprenoid pathway optimization for Taxol precursor overproduction in Escherichia coli. In: Science 330(6000), S. 70–74

Alphey, L., Benedict, M., Bellini, R., Clark, G.G., Dame, D.A., Service, M.W., Dobson, S.L. (2010): Sterile-insect methods for control of mosquito-borne diseases: An analysis. In: Vector-Borne Zoonotic Diseases 10(3), S. 295–311

Anderson, J.C., Clarke, E.J., Arkin, A.P., Voigt, C.A. (2006): Environmentally controlled invasion of cancer cells by engineered bacteria. In: Journal of Molecular Biology 355(4), S. 619–627

Annaluru, N., Muller, H., Mitchell, L.A., Ramalingam, S., Stracquadanio, G., Richardson, S.M., Dymond, J.S., Kuang, Z., Scheifele, L.Z., Cooper, E.M., Cai, Y. et al. (2014): Total synthesis of a functional designer eukaryotic chromosome. In: Science 344(6179), S. 55–58

Anthony, L., Newman, J. (2010): Production of isoprenoids. US Patentanmeldung US 2010/0178679 A1, 15.07.2010, www.google.de/patents/US20100178679 (25.11.2015)

Arnaldi, S., Lorenzet, A. (2014): Report online repository: Knowledge base for MML on Issues Related to SynBio Innovation Policies. Unpublished Deliverable D4.1. SYNENERGENE, Karlsruhe, Padua

Atlas, R., Campbell, P., Cozzarelli, N.R., Curfman, G., Enquist, L., Fink, G., Flanagin, A., Fletcher, J., George, E., Hammes, G., Heyman, D. et al. (2003a): Statement on the consideration of biodefence and biosecurity. In: Nature 421(6925), S. 771

Atlas, R., Campbell, P., Cozzarelli, N.R., Curfman, G., Enquist, L., Fink, G., Flanagin, A., Fletcher, J., George, E., Hammes, G., Heyman, D. et al. (2003b): Statement on scientific publication and security. In: Science 299(5610), S. 1149

Atlas, R., Campbell, P., Cozzarelli, N.R., Curfman, G., Enquist, L., Fink, G., Flanagin, A., Fletcher, J., George, E., Hammes, G., Heyman, D. et al. (2003c): Uncensored exchange of scientific results. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 100(4), S. 1464

Atsumi, S., Cann, A.F., Connor, M.R., Shen, C.R., Smith, K.M., Brynildsen, M.P., Chou, K.J., Hanai, T., Liao, J.C. (2008): Metabolic engineering of Escherichia coli for 1-butanol production. In: Metabolic Engineering 10(6), S. 305–311

Atsumi, S., Higashide, W., Liao, J.C. (2009): Direct photosynthetic recycling of carbon dioxide to isobutyraldehyde. In: Nature Biotechnology 27(12), S. 1177–1180

Ausländer, S., Fussenegger, M. (2013): From gene switches to mammalian designer cells: Present and future prospects. In: Trends in Biotechnology 31(3), S. 155–168

Bahnsen, U. (2010): Ein Schöpfungsakt. In: Die ZEIT, 27.05.2010, www.zeit.de/2010/22/N-Biologie

Baker, B. (2015): DIYbio – alternative career path for biologists? In: BioScience 65(1), S. 112

Balmer, A., Herreman, C. (2009): Craig Venter and the re-programming of life: how metaphors shape and perform ethical discourses in the media presentation of synthetic biology. In: Nerlich, B., Elliott, R., Larson, B. (Hg.): Communicating biological sciences. Ethical and metaphorical dimensions. Burlington, S. 219–236

Baltimore, D., Berg, P., Botchan, M., Carroll, D., Charo, R.A., Church, G., Corn, J.E., Daley, G.Q., Doudna, J.A., Fenner, M., Greely, H.T. et al. (2015): A prudent path forward for genomic engineering and germline gene modification. In: Science 348(6230), S. 36–38

Barac, T., Taghavi, S., Borremans, B., Provoost, A., Oeyen, L., Colpaert, J.V., Vangronsveld, J., Lelie, D. van der (2004): Engineered endophytic bacteria improve phytoremediation of water-soluble, volatile, organic pollutants. In: Nature Biotechnology 22(5), S. 583–588

Bauer-Panskus, A., Then, C. (2015): Der lange Arm der Industrie: Einflussnahme auf Forschung und Behörden in Deutschland im Bereich Gentechnik und Lebensmittelsicherheit. Testbiotech e. V., München, www.testbiotech.org/node/1144 (16.11.2015)

BBSRC (Biotechnology and Biological Sciences Research Council), EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council), Sciencewise – ERC (2010): Synthetic Biology Dialogue (Autoren: Bhattachary, D., Calitz, J., Hunter, A.). o. O., www.bbsrc.ac.uk/documents/1006-synthetic-biology-dialogue-pdf/ (16.11.2015)

BCC Research (2011): Synthetic biology: Emerging global markets. Report Code: BIO066B, www.bccresearch.com/market-research/biotechnology/global-synthetic-biology-markets-bio066b.html (16.11.2015)

Bechmann, G. (1997): Diskursivität und Technikgestaltung. In: Köberle, S., Gloede, F., Hennen, L. (Hg.): Diskursive Verständigung? Mediation und Partizipation in Technikkontroversen. Baden-Baden, S. 151–163

Becker, M.M., Graham, R.L., Donaldson, E.F., Rockx, B., Sims, A.C., Sheahan, T., Pickles, R.J., Corti, D., Johnston, R.E., Baric, R.S., Denison, M.R. (2008): Synthetic recombinant bat SARS-like coronavirus is infectious in cultured cells and in mice. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 105(50), S. 19944–19949

Becker, H. (1993): Pflanzenzüchtung. Stuttgart

Bennett, G. (2011): Open technology platforms: (How) Should the BIOFAB give things away? Biofab Human Practices Report 3.0., http://biofab.synberc.org/sites/default/files/HPIP_Report%203.0_v1_0.pdf (16.11.2015)

Bennett, G., Gilman, N., Stavrianakis, A., Rabinow, P. (2009): From synthetic biology to biohacking: Are we prepared? In: Nature Biotechnology 27(12), S. 1109–1111

Bensaude-Vincent, B. (2013a): Discipline-building in synthetic biology. In: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences 44(2), S. 122–129

Bensaude-Vincent, B. (2013b): Between the possible and the actual: Philosophical perspectives on the design of synthetic organisms. In: Futures 48, S. 23–31

Bercovici, J. (2014): These startup dudes want to make women's private parts smell like ripe fruit. In: Inc., 19.11.2014, www.inc.com/jeff-bercovici/sweet-peach-probiotics-lady-parts.html (16.11.2015)

Berger, K.M., Wolinetz, C., McCarron, K., You, E., So, K.W. (2012): Bridging science and security for biological research: a dialogue between universities and the Federal Bureau of Investigation. Report of a Meeting, February 21-22 2012, http://listserv.aaas.org/pipermail/wspa/attachments/20120424/2f8b73fd/attachment-0001.pdf (16.11.2015)

Bernauer, H., Christopher, J., Deininger, W., Fischer, M., Habermeier, P., Heumann, K., Maurer, S., Schwer, H., Stähler, P., Wagner, T. (2008): Technical solutions for biosecurity in synthetic biology. Workshop report, April 3rd 2008, München, www.synbiosafe.eu/uploads///pdf/iasb_report_biosecurity_syntheticbiology.pdf (16.11.2015)

BfN (Bundesamt für Naturschutz) (o.J.): Aktuelle F+E-Vorhaben: Herausforderungen einer Risikobewertung von GVP ohne Komparator und Entwicklung eines Konzepts. www.bfn.de/20948.html (16.11.2015)

Biocom AG (2013) (Hg.): Nächste Generation biotechnologischer Verfahren. Bilanz und Ausblick der Initiative Biotechnologie 2020+. Berlin

BIO Deutschland (2008): Positionspapier der BIO Deutschland zum Thema Biosicherheit – Die Dual-Use-Problematik. Bio Deutschland e. V., Berlin, www.biodeutsch-land.org/tl_files/content/positionspapiere/BIO-D_Positionspapier_Biosicherheit.pdf (16.11.2015)

Biosicherheit (2012a): Pharmapflanzen: Der Stand der Dinge. www.biosicherheit.de/fokus/483.pharmapflanzen-stand.html (16.11.2015)

Biosicherheit (2012b): Freisetzung gentechnisch veränderter Bäume. Jede Menge Pappeln. www.biosicherheit.de/basisinfo/311.menge-pappeln.html (16.11.2015)

Black, W.C. 4th, Alphey, L., James, A.A. (2011): Why RIDL is not SIT. In: Trends in Parasitology 27(8), S. 362–370

Blain, J.C., Szostak, J.W. (2014): Progress toward synthetic cells. In: Annual Review of Biochemistry 83, S. 615–640

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2014a): 25 Jahre BMBF-Forschungsprogramme zur biologischen Sicherheitsforschung. Umweltwirkungen gentechnisch veränderter Pflanzen. Berlin, www.bmbf.de/pub/Biologische_Sicher-heitsforschung.pdf (16.11.2015)

BMBF (2014b): Wegweiser Bioökonomie. Forschung für biobasiertes und nachhaltiges Wirtschaftswachstum. Berlin, www.bmbf.de/pub/Wegweiser-Biooekonomie.pdf (16.11.2015)

BMBF (2015): Ausgaben für Forschung und Entwicklung auf hohem Niveau. Pressemitteilung 006/2015, www.bmbf.de/press/3730.php (16.11.2015)

BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2014): Nationale Politikstrategie Bioökonomie. Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie. Berlin, www.bmbf.de/files/BioOekonomiestrategie.pdf (16.11.2015)

BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (2002): Diskurs Grüne Gentechnik – Ergebnisbericht. Bonn

BNN (Bundesverband Naturkost Naturwaren e. V.), BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland), BÖLW (Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft e. V.), DBIB (Deutscher Berufs- und Erwerbsimkerbund), GeN (Gen-ethisches Netzwerk e. V.), Greenpeace, Mellifera e. V., NABU, Sambucus e. V., Save Our Seeds, Testbiotech e. V. (2015): »Forschung im Bereich der Grünen Gentechnik« – Anhörung im Bundeslandwirtschaftsministerium am 26. Januar 2015. Verbändeforderungen für die Risikoforschung mit gentechnisch veränderten Pflanzen. www.gen-ethisches-netzwerk.de/files/1501RT_forschung_gentech_forderungen_web.pdf (23.11.2015)

Boheemen, P. van, Vriend, H. de (2014): Do-it yourself biology. Een verkenning van ontwikkelingen in Nederland. Amsterdam, www.waag.org/sites/waag/files/public/media/publicaties/cgm_2014-03_do-it-yourself_biology_een_verkenning_van_ont-wikkelingen_in_nederland.pdf (18.11.2015)

Boldt, J., Müller, O., Maio, G. (2009): Synthetische Biologie. Eine ethisch-philosophische Analyse. Bern

Boldt, J., Müller, O., Maio, G. (Hg.) (2012): Leben schaffen? Philosophische und ethische Reflexionen zur Synthetischen Biologie. Paderborn

Bond-Watts, B.B., Bellerose, R.J., Chang, M.C.Y. (2011): Enzyme mechanism as a kinetic control element for designing synthetic biofuel pathways. In: Nature Chemical Biology 7(4), S. 222–227

Bowser, A., Shanley, L. (2013): New visions in citizen science. In: Wilson Center, Commons Lab, Case study series 3, Washington, D.C., www.wilsoncenter.org/sites/default/files/NewVisionsInCitizen-Science.pdf (16.11.2015)

BR (Bayerischer Rundfunk) (2013): Die Gen-Köche. Dokumentarfilm (Regie: Schlichter, A., Karberg, S.), Deutschland, 2012, www.br.de/fernsehen/bayerisches-fernsehen/inhalt/film-und-serie/die-gen-koeche-dokumentarfilm-100.html (18.11.2015)

Breitbach, C.J., Burke, J., Jonker, D., Stephenson, J., Haas, A.R., Chow, L.Q., Nieva, J., Hwang, T.H., Moon, A., Patt, R., Pelusio, A. et al. (2011): Intravenous delivery of a multi-mechanistic cancer-targeted oncolytic poxvirus in humans. In: Nature 477(7362), S. 99–102

Bruce, D. (2010): Playing democs games to explore synthetic biology. www.edinethics.co.uk/synbio/synbio%20democs%20report.pdf (26.11.2015)

Bruno, G. (1585): Von den heroischen Leidenschaften. In: Wikiquote, http://de.wikiquote.org/wiki/Giordano_Bruno (18.11.2015)

Buhk, H.-J. (2014): Synthetic biology and its regulation in the European Union. In: New Biotechnology 31(6), S. 528–531

Bundesregierung (2003): Gesetzentwurf der Bundesregierung – Entwurf eines Gesetzes zu dem Protokoll von Cartagena vom 29. Januar 2000 über die biologische Sicherheit zum Übereinkommen über die biologische Vielfalt. Deutscher Bundestag, Drucksache 15/1519, Berlin

Bundesregierung (2011): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten René Röspel, Dr. Ernst Dieter Rossmann, Dr. Hans-Peter Bartels, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD – Drucksache 17/4898 – Stand und Perspektiven der Synthetischen Biologie. Deutscher Bundestag, Drucksache 17/5165, Berlin

Bundesregierung (2012): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten René Röspel, Dr. Ernst Dieter Rossmann, Willi Brase, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD – Drucksache 17/11169 – Stand und Perspektive der »Dual-Use«-Problematik in der biologischen Sicherheitsforschung an hochpathogenen Erregern. Deutscher Bundestag, Drucksache 17/11541, Berlin

Bundesregierung (2014): Unterrichtung durch die Bundesregierung. Bericht über die Auswirkungen des Patentrechts im Bereich der Biotechnologie unter anderem hinsichtlich ausreichender Technizität sowie hinsichtlich derAuswirkungen im Bereich der Pflanzen- und Tierzüchtung. Deutscher Bundestag, Drucksache 18/2119, Berlin

Bundesregierung (2015): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Kirsten Tackmann, Caren Lay, Karin Binder, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE – Drucksache 18/3638 – Nationale Gentechnik-Anbauverbote. Deutscher Bundestag, Drucksache 18/3737, Berlin

Bundschuh, A. (2012): Lernprozess oder Misserfolg? In: Gen-ethischer Informationsdienst (GID) 215, S. 15-17

Bünger, M., Udupa, S., Schiamberg, B., Faulconer, L., Holman, M. (2009): Synthetic biology's commercial roadmap. Lux Research, Boston

Büning, H. (2013): Gene therapy enters the pharma market: The short story of a long journey. In: EMBO Molecular Medicine 5(1), S. 1–3

Burk, M.J., Burgard, A.P., Osterhout, R.E., Sun, J. (2010): Microorganisms for the production of 1,4-butanediol. WIPO Patentanmeldung WO 2010/030711 A2, 18.03.2010, https://patentscope.wipo.int/search/en/WO2010030711 (25.11.2015)

Burt, A., Koufopanou, V. (2004): Homing endonuclease genes: The rise and fall and rise again of a selfish element. In: Current Opinion in Genetics and Developement 14(6), S. 609–615

Butler, D. (2014): Biosafety controls come under fire. In: Nature 511(7511), S. 515–516

Buyx, A., Tait, J. (2011): Ethical framework for biofuels. In: Science 332(6029), S. 540–541

Bygbjerg, I.C. (2012): Double burden of noncommunicable and infectious diseases in developing countries. In: Science 337(6101), S. 1499–1501

Callaway, E. (2014): First synthetic yeast chromosome revealed. In: Nature News, 27. März, www.nature.com/news/first-synthetic-yeast-chromosome-revealed-1.14941 (18.11.2015)

Calvert, J., Martin, P. (2009): The role of social scientists in synthetic biology. In: EMBO Reports 10(3), S. 201–204

Camacho, A., Deynze, A. van, Chi-Ham, C., Bennett, A.B. (2014): Genetically engineered crops that fly under the US regulatory radar. In: Nature Biotechnology 32(11), S. 1087–1091

Campos, L. (2010): That was the synthetic biology that was. In: Schmidt et al. 2009, S. 5–21

Carlson, D.F., Fahrenkrug, S.C., Hackett, P.B. (2012): Targeting DNA with fingers and TALENs. In: Molecular Therapy Nucleic Acids 1, e3, www.nature.com/mtna/journal/v1/n1/full/mtna20115a.html (18.11.2015)

Cars, O., Hedin, A., Heddini, A. (2011): The global need for effective antibiotics – moving towards concerted action. In: Drug Resistance Updates 14(2), S. 68–69

Carter, S.R., Rodemeyer, M., Garfinkel, M.S., Friedman, R.M. (2014): Synthetic biology and the U.S. regulatory system: Challenges and options. J. Craig Venter Institute, www.jcvi.org/cms/fileadmin/site/research/projects/synthetic-biology-and-the-us-regulatory-system/full-report.pdf (16.11.2015)

Catenhusen, W.-M., Dabrock, P., Pühler, A., Taupitz, A. (2013): Zur gesellschaftlichen Verantwortung auf dem Gebiet der Synthetischen Biologie. In: DER 2011, S. 127–133

Cattaneo, R., Miest, T., Shashkova, E.V., Barry, M.A. (2008): Reprogrammed viruses as cancer therapeutics: Targeted, armed and shielded. In: Nature Reviews Microbiology 6(7), S. 529–540

Cello, J., Paul, A.V., Wimmer, E. (2002): Chemical synthesis of poliovirus cDNA: Generation of infectious virus in the absence of natural template. In: Science 297(5583), S. 1016–1018

Chakraborty, R., Wu, C.H., Hazen, T.C. (2012): Systems biology approach to bioremediation. In: Current Opinion in Biotechnology 23(3), S. 483–490

Charisius, H. (2010): Künstliches Leben: Premiere – Craig Venter spielt Gott. In: Süddeutsche Zeitung, 21.05.2010, www.sueddeutsche.de/wissen/kuenstliches-leben-premiere-craig-venter-spielt-gott-1.945572 (23.11.2015)

Charisius, H., Karberg, S., Friebe, R. (2012): Wir Genbastler. In: Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 29.04.12, S. 57–60

Charisius, H., Karberg, S., Friebe, R. (2013a): Becoming biohackers: The long arm of the law. In: BBC-future, 24.01.2013, www.bbc.com/future/story/20130124-biohacking-fear-and-the-fbi (18.11.2015)

Charisius, H., Karberg, S., Friebe, R. (2013b): Biohacking. Gentechnik aus der Garage. München

Choi, Y.J., Lee, S.Y. (2013) Microbial production of short-chain alkanes. In: Nature 502(7472), S. 571–574

Church, G. (2004): A synthetic biohazard non-proliferation proposal. Harvard Medical School, 18.06.2004, http://arep.med.harvard.edu/SBP/Church_Biohazard04c.htm (18.11.2015)

Church, G. (2005): Let us go forth and safely multiply. In: Nature 438(7076), S. 423

CIA (Central Intelligence Agency) (2003): The darker bioweapon future. 03.11.2003, http://fas.org/irp/cia/product/bw1103.pdf (18.11.2015)

Coenen, C. (2006): Der posthumanistische Technofuturismus in den Debatten über Nanotechnologie und Converging Technologies. In: Nordmann, A., Schummer, J., Schwarz, A. (Hg.): Nanotechnologien im Kontext. Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven. Berlin, S. 195–222

Coenen, C., Hennen, L., Link, H.-J. (2009): The ethics of synthetic biology. Contours of an emerging discourse. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 18(2), S. 82–86

Coenen, C., Hennen, L., Heil, R. (2010): The public discourse on synthetic biology – some results of the first phase of Synth-Ethics. In: Synth-Ethics Project (Hg.): Identification of ethical issues and analysis of public discourse. FP7 »Synth-Ethics« Report WP1 (Deliverable 1), S. 50–88, www.synthethics.eu/documents/REPORT%20WP1%20synthethics%20-%20ethics+public%20discourse.pdf (18.11.2015)

COGEM (The Netherlands Commission on Genetic Modification) (2008): Biological machines? Anticipating developments in synthetic biology. Bilthoven

Cohen, J. (2012): Avian influenza. The limits of avian flu studies in ferrets. In: Science 335(6068), S. 512–513

Cohen, J. (2014): Alarm over biosafety blunders. In: Science 345(6194), S. 247–248

Cole, J.A. (2014): Synthetic biology: Old wine in new bottles with an emerging language that ranges from the sublime to the ridiculous? In: FEMS Microbiology Letters 351, S. 113–115

Coleman, J.R., Papamichail, D., Skiena, S., Futcher, B., Wimmer, E., Mueller, S. (2008): Virus attenuation by genome-scale changes in codon pair bias. In: Science 320(5884), S. 1784–1787

Collingridge, D. (1980): The social control of technology. London

Cong, L., Ran, F.A., Cox, D., Lin, S., Barretto, R., Habib, N., Hsu, P.D., Wu, X., Jiang, W., Marraffini, L.A., Zhang, F. (2013): Multiplex genome engineering using CRISPR/Cas systems. In: Science 339(6121), S. 819–823

Conlan, B., Cox, N., Su, J.-H., Hillier, W., Messinger, J., Lubitz, W., Dutton, P.L., Wydrzynski, T. (2009): Photo-catalytic oxidation of a di-nuclear manganese centre in an engineered bacterioferritin »reaction centre«. In: Biochimica et Biophysica Acta 1787(9), S. 1112–1121

Connor, M.R., Atsumi, S. (2010): Synthetic biology guides biofuel production. In: Journal of Biomedicine and Biotechnology 2010, www.hindawi.com/journals/bmri/2010/541698/ (18.11.2015)

Connor, S. (2010): Public is relaxed about artificial life, says study. In: The Independent Online, 22.05.2010, www.independent.co.uk/news/science/public-is-relaxed-about-artificial-life-says-study-1979967.html (18.11.2015)

Costa, B. da, Philip, K. (Hg.) (2008): Tactical biopolitics. Art, activism and bioscience. Cambridge u. a. O., https://itp.nyu.edu/classes/germline-spring2013/files/2013/01/The_ethics_of_experiential_engagement_with_the_manipulation_of_life.pdf (20.11.2015)

Costa, K. (2014): Synberc and societal aspects of synthetic biology: Lessons learned for the next ten years. Vortrag beim Workshop »Research Agendas on the Societal Aspects of Synthetic Biology«, Tempe, Arizona, 4.–6.11.2014

Crabtree, J. (2012): More with less. In: Financial Times UK, 19.05.2012, www.ft.com/cms/s/2/d5612fac-960f-11e1-a6a0-00144feab49a.html (18.11.2015)

Critical Art Ensemble (2006): Die molekulare Invasion. Münster

Critical Art Ensemble, Institute for Applied Autonomy (2009): Kunst und Recht III, Seized Ausstellung. www.artlaboratory-berlin.org/html/de-ausstellung-15.htm (18.11.2015)

Cserer, A., Seiringer, A. (2009): Pictures of synthetic biology. A reflective discussion of the representation of synthetic biology (SB) in the German-language media and by SB experts. In: Systems and Synthetic Biology 3(1–4), S. 27–35

CSOs (Civil Society Organizations) (2011): Open letter from civil society organizations in response to the field release of genetically modified mosquitoes in Malaysia. www.econexus.info/publication/open-letter-release-gm-mosquitos-malaysia (18.11.2015)

Culler, S.J., Hoff, K.G., Smolke, C.D. (2010): Reprogramming cellular behavior with RNA controllers responsive to endogenous proteins. In: Science 330(6008), S. 1251–1255

Cyranoski, D. (2015): Ethics of embryo editing divides scientists. In: Nature 519(7543), S. 272

Daar, A.S., Singer, P.A., Persad, D.L, Pramming, S.K., Matthews, D.R., Beaglehole, R., Bernstein, A., Borysiewicz, L.K., Colagiuri, S., Ganguly, N., Glass, R.I. et al. (2007): Grand challenges in chronic non-communicable diseases. In: Nature 450
(7169), S. 494–496

Dabrock, P., Bölker, M., Braun, M., Ried, J. (Hg.) (2011): Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie. Freiburg/München

Dana, G.V., Kuiken, T., Rejeski, D, Snow, A.A. (2012): Synthetic biology: Four steps to avoid a synthetic-biology disaster. In: Nature 483(7387), S. 29

Daniel, H., Reisch, L. (2014): Konsum, Natur, Nachhaltigkeit. Warum Bioökonomie ohne Verhaltensänderungen nicht denkbar ist. In: Rundbrief Forum Umwelt & Entwicklung 4, S. 5–6

Davis, M., Laas, K. (2014): »Broader impacts« or »Responsible Research and Innovation«? A comparison of two criteria for funding research in science and engineering. In: Science and Engineering Ethics 20(4), S. 963–983

DECHEMA (DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.) (2011): Thesenpapier zum Status der Synthetischen Biologie in Deutschland. Arbeitskreis Systembiologie und Synthetische Biologie, Frankfurt a.M.

Dellomonaco, C., Fava, F., Gonzalez, R. (2010): The path to next generation biofuels: successes and challenges in the era of synthetic biology. In: Microbial Cell Factories 9(3), www.microbialcellfactories.com/content/9/1/3 (8.5.2015)

DER (Deutscher Ethikrat) (2010): Unterrichtung durch den Deutschen Ethikrat. Jahresbericht 2009. Deutscher Bundestag, Drucksache 17/1540, Berlin

DER (Hg.) (2011): Werkstatt Leben. Bedeutung der Synthetischen Biologie für Wissenschaft und Gesellschaft. Vorträge der Tagung des Deutschen Ethikrates 2011. Berlin

DER (2013): Biosicherheit – Freiheit und Verantwortung in der Wissenschaft. Öffentliche Anhörung, 25.04.2013, Berlin, www.ethikrat.org/dateien/pdf/anhoerung-25-04-2013-simultanmitschrift.pdf (18.11.2015)

DER (2014): Biosicherheit – Freiheit und Verantwortung in der Wissenschaft. Stellungnahme. Berlin

Deredec, A., Godfray, H.C., Burt, A. (2011): Requirements for effective malaria control with homing endonuclease genes. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 108(43), S. E874–E880

Desai, S.K., Gallivan, J.P. (2004): Genetic screens and selections for small molecules based on a synthetic riboswitch that activates protein translation. In: Journal of the American Chemical Society 126(41), S. 13247–13254

DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) (2012): Entwicklung der Gentherapie. Stellungnahme der Senatskommission für Grundsatzfragen der Genforschung. Bonn, www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/geschaeftsstelle/publikationen/entwick lung_gentherapie_0612_dt.pdf (20.11.2015)

DFG (2013): Verhaltenscodex: Arbeit mit hochpathogenen Mikroorganismen und Toxinen. Senatskommission für Grundsatzfragen der Genforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn, www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/reden_ stellungnahmen/2013/130313_verhaltenscodex_dual_use.pdf (18.11.2015)

DFG, Leopoldina (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. – Nationale Akademie der Wissenschaften) (2014): Wissenschaftsfreiheit und Wissenschaftsverantwortung. Empfehlungen zum Umgang mit sicherheitsrelevanter Forschung. Bonn/Halle (Saale)

DFG, acatech (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.), Leopoldina (2009): Synthetische Biologie. Stellungnahme, Bonn u. a. O.

DHHS (United States Department of Health and Human Services) (2010): Screening framework guidance for providers of synthetic double-stranded DNA. o. O., www.phe.gov/preparedness/legal/guidance/syndna/Pages/default.aspx (18.11.2015)

Diekämper, J. (2012): Die Synthetische Biologie in den Medien. In: Köchy/Hümpel 2012, S. 215–233

Dolgin, E. (2015): Safety boost for GM organisms. In: Nature 517(7535), S. 423

Doren, D. van, Koenigstein, S., Reiß, T. (2013): The development of synthetic biology: A patent analysis. In: Systems and Synthetic Biology 7(4), S. 209–220

Dorer, D.E., Nettelbeck, D.M. (2009): Targeting cancer by transcriptional control in cancer gene therapy and viral oncolysis. In: Advanced Drug Delivery Review 61(7–8), S. 554–571

Dormitzer, P.R., Suphaphiphat, P., Gibson, D.G., Wentworth, D.E., Stockwell, T.B., Algire, M.A., Alperovich, N., Barro, M., Brown, D.M., Craig, S., Dattilo, B.M. et al. (2013): Synthetic generation of influenza vaccine viruses for rapid response to pandemics. In: Science Translational Medicine 5(185), S. 185ra168

Dornburg, V., Lewandowski, I., Patel, M. (2004): Comparing the land requirements, energy savings, and greenhouse gas emissions reduction of biobased polymers and bioenergy. In: Journal of Industrial Ecology 7(3–4), S. 93–116

Doudna, J.A., Charpentier, E. (2014): The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. In: Science 346(6213), S. 1077

Douglas, C.M.W., Stemerding, D. (2014): Challenges for the European governance of synthetic biology for human health. In: Life Sciences, Society and Policy 10(6), www.lsspjournal.com/content/10/1/6 (18.11.2015)

Drinkwater, K., Kuiken, T., Lightfoot, S., McNamara, J., Oye, K. (2014): Creating a research agenda for the ecological implications of synthetic biology. Joint Workshops by the MIT Program on Emerging Technologies and the Wilson Center's Synthetic Biology Project. Washington, D.C., www.synbioproject.org/site/assets/ files/1374/synbio_res_agenda1.pdf (18.11.2015)

Duan, F.P., March, J.C. (2010): Engineered bacterial communication prevents Vibrio cholerae virulence in an infant mouse model. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 107(25), S. 11260–11264

Dugge, M. (2013): Rüdiger Trojok, Biohacker. hr-info im Gespräch, Audio-Podcast, www.podcast.de/episode/234361951/R%25C3%25BCdiger%2BTrojok%252C%2BBiohacker/ (18.11.2015)

Dürre, S. (2011): Fermentative production of butanol – the academic perspective. In: Current Opinion in Biotechnology 22(3), S. 331–336

EASAC (The European Academies Science Advisory Council) (2010): Realising European potential in synthetic biology: Scientific opportunities and good governance. EASAC policy report 13, EASAC Secretariat, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale) www.easac.eu/filead-min/PDF_s/reports_statements/Synthetic%20Biology%20report.pdf (18.11.2015)

EC (European Commission) (2007): Taking European knowledge society seriously. Report of the Expert Group on Science and Governance to the Science, Economy and Society Directorate, Directorate-General for Research, European Commission. www.bmbf.de/pub/EuropeanKnowledge%286 %29.pdf (18.11.2015)

EC (2013): Options for Strengthening Responsible Research and Innovation. Report of the Expert Group on the State of Art in Europe on Responsible Research and Innovation. http://ec.europa.eu/re-search/science-society/document_library/pdf_06/options-for-strengthening_en.pdf (18.11.2015)

Economist (2013): What happened to biofuels? In: The Economist, 07.09., www.eco nomist.com/news/technology-quarterly/21584452-energy-technology-making-large-amounts-fuel-or-ganic-matter-has-proved-be (18.11.2015)

EEA (European Environment Agency) (2002): Late lessons from early warnings: The precautionary principle 1896–2000. Environmental issue report 22, Kopenhagen

Eelkema, R., Pollard, M.M., Vicario, J., Katsonis, N., Ramon, B.S., Bastiaansen, C.W., Broer, D.J., Feringa, B.L. (2006): Molecular machines: Nanomotor rotates microscale objects. In: Nature 440(7081), S. 163

EFSA (European Food Safety Authority) (2011): Guidance on selection of comparators for the risk assessment of genetically modified plants and derived food and feed. Scientific Opinion, EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO). In: EFSA Journal 9(5), S. 2149, www.efsa.europa.eu/de/ef-sajournal/doc/2149.pdf (19.11.2015)

EFSA (2013): Guidance on the environmental risk assessment of genetically modified animals. Scientific Opinion, EFSA Panel on Gegentically Modified Organisms (GMO). In: EFSA Journal 11(5), S. 3200, www.efsa.europa.eu/sites/default/files/scientific_output/files/main_documents/3200.pdf (19.11.2015)

EGE (European Group on Ethics in Science and New Technologies to the European Commission) (2009): Ethics of synthetic biology. Opinion 25, Brüssel

Eggleson, K. (2014): Transatlantic divergences in citizen science ethics – comparative analysis of the DIYbio code of ethics drafts of 2011. In: NanoEthics 8(2), S. 187–192

EKAH (Schweizerische Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich) (2010): Synthetische Biologie – Ethische Überlegungen. Bern

Ellis, D.I., Goodacre, R. (2011): Metabolomics-assisted synthetic biology. In: Current Opinion in Biotechnology 23(1), S. 22–28

Elsbach, S. (2011): Die Diskussion der synthetischen Biologie in Polen. Eine Medienanalyse polnischer Zeitungen für den Zeitraum von 2007 bis 2010. Chemnitz (unveröffentlicht)

Emptage, M., Haynie, S.L., Laffend, L.A., Pucci, J.P., Whited, G. (2003): Process for the biological production of 1,3-propanediol with high titer. US Patentschrift US 6514733 B1, 04.02.03, www.google.com/patents/US6514733 (25.11.2015)

Endy, D. (2005): Foundations for engineering biology. In: Nature 438(24), S. 449–453

Engelhard, M. (Hg.) (2015): Synthetic biology analyzed. Tools for discussion and evaluation. Berlin

Enserink, M. (2010): Science and society. GM mosquito trial alarms opponents, strains ties in Gates-funded project. In: Science 330(6007), S. 1030–1031

Epstein, G.L. (2012): Preventing biological weapon development through the governance of life science research. In: Biosecurity and Bioterrorism: Biodefense Strategy, Practice, and Science 10(1), S. 17–37

EPTA (European Parliamentary Technology Assessment Network) (2011): Synthetic Biology. Briefing note 1, o. O., www.tab-beim-bundestag.de/en/research/u9800/EPTA_briefingnote_A4.pdf

ERASynBio (European Research Area Network for the development and coordination of synthetic biology in Europe) (2014): Next steps for European synthetic biology: A strategic vision from ERASynBio. www.erasynbio.eu/lw_resource/datapool/_items/item_58/erasynbiostrategicvision.pdf (19.11.2015)

Esvelt, K.M., Smidler, A.L., Catteruccia, F., Church, G.M. (2014): Concerning RNA-guided gene drives for the alteration of wild populations. In: eLIFE 2014, 10.7554/eLife.03401, http://elifesciences.org/content/elife/early/2014/07/15/eLife.03401.full.pdf (19.11.2015)

ETAG (European Technology Assessment Group) (2012): Making perfect life – final report. European governance challenges in 21st century bio-engineering. Est, R. van, Stemerding, D. (Hg.), Rathenau Instituut, Den Haag

ETC Group (Action Group on Erosion, Technology and Concentration) (2007): Extreme genetic engineering. An introduction to synthetic biology. www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/publication/602/01/synbioreportweb.pdf (19.11.2015)

ETC Group (2008): Commodifying nature’s last straw? Extreme genetic engineering and the post-petroleum sugar economy. www.etcgroup.org/fr/node/703 (19.11.2015)

ETC Group (2013a): Putting the cartel before the horse ... and farm, seeds, soil, peasants, etc: Who will control the agricultural inputs. Communiqué ETC Group No. 111, www.etcgroup.org/putting_the_cartel_before_the_horse_2013 (19.11.2015)

ETC Group (2013b): Vanilla & synthetic biology. A case study. 2013 Update, www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/Vanilla_SynBio_case_study_Oct2013.pdf (19.11.2015)

ETC Group, Friends of the Earth (2013): Kickstopper letter to »Glowing Plants« project. ETC Group and Friends of the Earth request a halt to synthetic biology project. www.etcgroup.org/content/kickstopper-letter-glowing-plants-project (19.11.2015)

Ethikbeirat (Parlamentarischer Beirat zu Fragen der Ethik insbesondere in den Lebenswissenschaften) (2009): Unterrichtung durch den Parlamentarischen Beirat zu Fragen der Ethik insbesondere in den Lebenswissenschaften. Bericht über die Arbeit des Ethikbeirats (Berichtszeitraum 23. April 2008 bis 17. Juni 2009). Deutscher Bundestag, Drucksache 16/13780, Berlin

Ezezika, O.C., Singer. P.A. (2010): Genetically engineered oil-eating microbes for bioremediation: Prospects and regulatory challenges. In: Technology in Society 32(4), S. 331–335

Facchinelli, L., Valerio, L., Ramsey, J.M., Gould, F., Walsh, R.K., Bond, G., Robert, M.A., Lloyd, A.L., James, A.A., Alphey, L., Scott, T.W. (2013): Field cage studies and progressive evaluation of genetically-engineered mosquitoes. In: PLoS Neglected Tropical Diseases 7(1), e2001

Faden, R.R., Karron, R.A. (2012): The obligation to prevent the next dual-use controversy. In: Science 335(6070), S. 802–804

Felt, U., Barben, D., Irwin, A., Joly, P.-B., Rip, A., Stirling, A., Stöckelová, T. (2013): Science in Society: caring for our futures in turbulent times. Science Policy Briefing 50, European Science Foundation, Straßburg, www.esf.org/fileadmin/Public_documents/Publications/spb50_ScienceInSociety.pdf (19.11.2015)

Ferry, D. (2015): The Promises and Perils of Synthetic Biology. In: Newsweek, 11.03.2015, www.newsweek.com/2015/03/20/promises-and-perils-synthetic-biology-312849.html (19.11.2015)

Finke, P. (2014): Citizen Science. Das unterschätzte Wissen der Laien. München

Fisher, E., Mahajan, R.L., Mitcham, C. (2006): Midstream modulation of technology: Governance from within. In: Bulletin of Science, Technology & Society 26(6), S. 485–496

Fong, S.S. (2014): Computational approaches to metabolic engineering utilizing systems biology and synthetic biology. In: Computational and Structural Biotechnology Journal 11(18), S. 28–34

Forbes, N.S. (2010): Engineering the perfect (bacterial) cancer therapy. In: Nature Reviews Cancer 10(11), S. 785–794

Forsberg, E.-M. (2014): Institutionalising ELSA in the moment of breakdown? In: Life Sciences, Society and Policy 10(1), www.lsspjournal.com/content/pdf/2195-7819-10-1.pdf (23.11.2015)

Forschungswende (Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende – Vereinigung Deutscher Wissenschaftler VDW e. V.) (2014): Eckpunktepapier zu einer gemeinwohlorientierten Forschungspolitik. Berlin, www.researchincommunity.net/filead min/files/Transdisziplinar_Partizipation/Eckpunkte_einer_gemeinwohlorien-tierten_Forschungspolitik.pdf (19.11.2015)

Forster, A.C., Church, G.M. (2007): Synthetic biology projects in vitro. In: Genome Research 17(1), S. 1–6

Fortmann, J.L., Chhabra, S., Mukhopadhyay, A., Chou, H., Lee, T.S., Steen, E., Keasling, J.D. (2008): Biofuel alternatives to ethanol: pumping the microbial well. In: Trends in Biotechnology 26(7), S. 375–381

Fouchier, R.A., Garcia-Sastre, A., Kawaoka, Y. (2013a): H5N1 virus: Transmission studies resume for avian flu. In: Nature 493(7434), S. 609

Fouchier, R.A., Garcia-Sastre, A., Kawaoka, Y., Barclay, W.S., Bouvier, N.M., Brown, I.H., Capua, I., Chen, H., Compans, R.W., Couch, R.B., Cox, N.J. et al. (2013b): Transmission studies resume for avian flu. In: Science 339(6119), S. 520–521

Fouchier, R.A., Kawaoka, Y., Cardona, C., Compans, R.W., Garcia-Sastre, A., Govorkova, E.A., Guan, Y., Herfst, S., Orenstein, W.A., Peiris, J.S., Perez, D.R. et al. (2013c): Avian flu: Gain-of-function experiments on H7N9. In: Nature 500(7461), S. 150–151

Fouchier, R.A., Kawaoka, Y., Cardona, C., Compans, R.W., Garcia-Sastre, A., Govorkova, E.A., Guan, Y., Herfst, S., Orenstein, W.A., Peiris, J.S., Perez, D.R. et al. (2013d): Gain-of-function experiments on H7N9. In: Science 341(6146), S. 612–613

Fu, G., Condon, K.C., Epton, M.J., Gong, P., Jin, L., Condon, G.C., Morrison, N.I., Dafa'alla, T.H., Alphey, L. (2007): Female-specific insect lethality engineered using alternative splicing. In: Nature Biotechnology 25(3), S. 353–357

Fu, G., Lees, R.S., Nimmo, D., Aw, D., Jin, L., Gray, P., Berendonk, T.U., White-Cooper, H., Scaife, S., Kim Phuc, H., Marinotti, O. et al.( 2010): Female-specific flightless phenotype for mosquito control. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 107(10), S. 4550–4554

Gaisser, S., Reiss, T. (2009): Shaping the science–industry–policy interface in synthetic biology. In: Systems and Synthetic Biology 3(1–4), S. 109–114

Gaisser, S., Reiss, T., Lunkes, A., Müller, K.M., Bernauer, H. (2009): Making the most of synthetic biology. Strategies for synthetic biology development in Europe. In: EMBO reports 10, Suppl. 1, S. 5–8

Galafassi, S., Merico, A., Pizza, F., Hellborg, L., Molinari, F., Piškur, J., Compagno, C. (2011): Dekkera/Brettanomyces yeasts for ethanol production from renewable sources under oxygen-limited and low-pH conditions. In: Journal of Industrial Microbiology Biotechnology 38(8), S. 1079–1088

Galasso, A., Schankerman, M. (2014): Patents and cumulative innovation: Causal evidence from the courts. NBER Working Paper No. 20269. www.nber.org/papers/w20269 (19.11.2015)

GAO (United States Government Accountability Office) (2014): Anthrax. Agency approaches to validation and statistical analyses could be improved. Report to Congressional Requesters, December 2014, www.gao.gov/assets/670/667671.pdf (19.11.2015)

Garber, K. (2015): Drugging the gut microbiome. In: Nature Biotechnology 33(3), S. 228–231

Garfinkel, M.S., Endy, D., Epstein, G.L., Friedman, R.M. (2007): Synthetic genomics | options for governance. In: Biosecurity and Bioterrorism: Biodefense Strategy, Practice, and Science 5(4), S. 359–362

Garmendia, J., Heras, A. de las, Galvão, T.C., Lorenzo, V. de (2008): Tracing explosives in soil with transcriptional regulators of Pseudomonas putida evolved for responding to nitrotoluenes. In: Microbiolocigal Biotechnology 1(3), S. 236–246

Gaskell, G., Stares, S., Allansdottir, A., Allum, N., Castro, P., Esmer, Y., Fischler, C., Jackson, J., Kronberger, N., Hampel, J., Mejlgaard, N. et al. (2010): Europeans and biotechnology in 2010. Winds of change? European Union, Brüssel, https://ec.europa.eu/research/swafs/pdf/pub_archive/europeans-biotechnology-in-2010_en.pdf (19.11.2015)

Gelfert, A. (2013): Synthetic biology between technoscience and thing knowledge. In: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences 44(2), S. 141–149

GeN (Gen-ethisches Netzwerk e. V.), Testbiotech (e. V.) (2012): Brief an Frau Merkel wegen Diskussion um Vogelgrippenvirus. www.testbiotech.de/supervirus (19.11.205)

GeneWatch UK (2014): Failures of the transboundary notification process for living genetically modified insects. www.genewatch.org/uploads/f03c6d66a9b354535738 483c1c3d49e4/CPB_insects_sub_Aug14_v2.pdf (19.11.2015)

GeneWatch UK, Testbiotech e. V., Berne Declaration, SwissAid, Corporate Europe Observatory (2012): Genetically-modified insects: Under whose control? www.genewatch.org/uploads/f03c6d66a9b354535738483c1c3d49e4/Regnbrief_fin2.pdf (19.11.2015)

GfV (Gesellschaft für Virologie e. V.) (2014): Die Gesellschaft für Virologie äußert sich zur Stellungnahme des Deutschen Ethikrats: Biosicherheit – Freiheit und Verantwortung in der Wissenschaft. Newsletter 06/2014, www.g-f-v.org/sites/default/files/newsletter%2006-2014-Ethikrat%20Biosicherheit.pdf (19.11.2015)

Ghosh, P. (2010): Artificial life »needs regulation« – public survey says. In: BBC News Online, 14.06.2010, www.bbc.com/news/10297561 (19.11.2015)

Gibson, D.G., Benders, G.A., Andrews-Pfannkoch, C., Denisova, E.A., Baden-Tillson, H., Zaveri, J., Stockwell, T.B., Brownley, A., Thomas, D.W., Algire, M.A., Merryman, C. et al. (2008): Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a Mycoplasma genitalium genome. In: Science 319(5867), S. 1215–1220

Gibson, D.G., Glass, J.I., Lartigue, C., Noskov, V.N., Chuang, R.Y., Algire, M.A., Benders, G.A., Montague, M.G., Ma, L., Moodie, M.M., Merryman, C. et al. (2010): Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. In: Science 329(5987), S. 52–56

Gibson, D.G., Venter, J.C. (2014): Synthetic biology: Construction of a yeast chromosome. In: Nature 509(7499), S. 168–169

Giese, B.M., Pade, C., Wigger, H., Gleich, A. von (Hg.) (2014): Synthetic Biology. Character and Impact. Heidelberg u. a. O.

Gilbert, E.S., Walker, A.W., Keasling, J.D. (2003): A constructed microbial consortium for biodegradation of the organophosphorus insecticide parathion. In: Applied Microbiolgy and Biotechnology 61(1), S. 77–81

Gilbert, H.J. (2007): Cellulosomes: microbial nanomachines that display plasticity in quaternary structure. In: Molecular Microbiology 63(6), S. 1568–1576

Gill, B. (1991): Gentechnik ohne Politik. Wie die Brisanz der Synthetischen Biologie von wissenschaftlichen Institutionen, Ethik- und anderen Kommissionen systematisch verdrängt wird. Frankfurt/New York

Gill, B. (2011): Visionen und Dämonen der Biotechnologie. In: Kehrt, C., Schüssler, P., Weitze, M.-D. (Hg.): Neue Technologien in der Gesellschaft. Akteure, Erwartungen, Kontroversen und Konjunkturen. Bielefeld, S. 223–235

Gollan, J. (2011): Lab fight raises U.S. security issues. In: The New York Times, 23.10.2011, S. A25A, www.nytimes.com/2011/10/23/us/synberc-fight-raises-national-security-issues.html (19.11.2015)

Gomaa, A.A., Klumpe, H.E., Luo, M.L., Selle, K., Barrangou, R., Beisel, C.L. (2014): Programmable removal of bacterial strains by use of genome-targeting CRISPR-Cas systems. In: mBio 5(1), S. e00928–13, http://mbio.asm.org/content/5/1/e00928-13.full.pdf+html (19.11.2015)

González, F., Zhu, Z., Shi, Z.D., Lelli, K., Verma, N., Li, Q.V., Huangfu, D. (2014): An iCRISPR platform for rapid, multiplexable, and inducible genome editing in human pluripotent stem cells. In: Cell Stem Cell 15(2), S. 215–226

Graef, F., Römbke, J., Binimelis, R., Myhr, A.I., Hilbeck, A., Breckling, B., Dalgaard, T., Stachow, U., Catacora-Vargas, G., Bøhn, T., Quist, D. et al. (2012): A framework for a European network for a systematic environmental impact assessment of genetically modified organisms (GMO). In: BioRisk 7, S. 73–97

Grant, L., Gardiner, C., Williams, B., Fisher, A. (2011): Synthetic biology dialogue follow up evaluation report. Laura Grant Associates www.bbsrc.ac.uk/documents/synbio-dialogue-evaluation-final-pdf/ (19.11.2015)

Green, A.A., Silver, P.A., Collins, J.J., Yin, P. (2014): Toehold switches: De-novo-designed regulators of gene expression. In: Cell 159(4), S. 925–939

Green, E.M. (2011): Fermentative production of butanol – the industrial perspective. In: Current Opinion in Biotechnology 22(3), S. 337–343

Greiter, A., Eckerstorfer, M., Heissenberger, A., Miklau, M., Dolezel, M., Sulzer, C., (o.J.): Challenges of a riks assessment of GMP without comparator and development of a concept (Herausforderungen einer Risikobewertung von GVP ohne Komparator und Entwicklung eines Konzepts). Abschlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz, Bonn/Wien (in Vorbereitung)

Groot, W.J., Borén, T. (2010): Life cycle assessment of the manufacture of lactide and PLA biopolymers from sugarcane in Thailand. In: The International Journal of Life Cycle Assessessment 15(9), S. 970–984

Groß, K. (2014): DIY – BioHacking beim CYNETART-Festival 2013. In: Arte CreativMagazin, 14.01.2014, www.katharinagross.tv/2014/02/diy-biohacking-beim-cynetart-festival-2013/ (25.11.2015)

Grunwald, A. (2002): Technikfolgenabschätzung – eine Einführung. Berlin

Grunwald, A. (2010): Vom Veränderer zum Schöpfer. Synthetische Biologie: Chancen, Risiken und Verantwortungsfragen. In: Forschung & Lehre 17(8), S. 558–560

Grunwald, A. (2012): Synthetische Biologie als Naturwissenschaft mit technischer Ausrichtung. Plädoyer für eine »Hermeneutische Technikfolgenabschätzung«. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 21(2), S. 10–15

Grunwald, A. (2013): Techno-visionary sciences. Challenges to policy advice. In: Science, Technology & Innovation Studies 9(2), S. 21–38

Grunwald, A. (2014): Technikfolgenabschätzung als »Assessment« von Debatten: TA jenseits der Technikfolgenforschung. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 23(2), S. 9–15

Grushkin, D., Kuiken, T., Millet, P. (2013): Seven myths & realities about do-it-yourself biology. Woodrow Wilson International Center for Scholars, Synthetic Biology Project, Synbio 5, November www.synbioproject.org/process/assets/files/6673/_draft/7_myths_final.pdf (19.11.2015)

Gschmeidler, B., Seiringer, A. (2012): »Knight in shining armour« or »Frankenstein's creation«? The coverage of synthetic biology in German-language media. In: Public Understanding of Science 21(1), S. 163–173

Guan, Y., Vijaykrishna, D., Bahl, J., Zhu, H., Wang, J., Smith, G.J. (2010): The emergence of pandemic influenza viruses. In: Protein Cell 1(1), S. 9–13

Gübeli, R.J., Schöneweis, K., Huzly, D., Ehrbar, M., Charpin-El Hamri, G., El-Baba, M.D., Urban, S., Weber, W. (2013): Pharmacologically triggered hydrogel for scheduling hepatitis B vaccine administration. In: Science Reports 3, S. 2610

Halford, N., Hudson, E., Gimson, A., Weightman, R., Shewry, P.R., Tompkins, S. (2014): Safety assessment of genetically modified plants with deliberately altered composition. In: Plant Biotechnology Journal 12(6), S. 651-654

Hampel, J. (2012): Synthetische Bioloie – eine unbekannte Technologie. In: Köchy/Hümpel 2012, S. 237–255

Harms, H., Wells, M.C., Meer, J. van der (2006): Whole-cell living biosensors — are they ready for environmental application? In: Applied Microbiology and Biotechnology 70(3), S. 273–280

Haro, M.-A., Lorenzo, V. de (2001): Metabolic engineering of bacteria for environmental applications: construction of Pseudomonas strains for biodegradation of 2-chlorotoluene. In: Journal of Biotechnology 85(2), S. 103–113

Harris, A.F., McKemey, A.R., Nimmo, D., Curtis, Z., Black, I., Morgan, S.A., Oviedo, M.N., Lacroix, R., Naish, N., Morrison, N.I., Collado, A. et al. (2012): Successful suppression of a field mosquito population by sustained release of engineered male mosquitoes. In: Nature Biotechnology 30(9), S. 828–830

Harris, A.F., Nimmo, D., McKemey, A.R., Kelly, N., Scaife, S., Donnelly, C.A., Beech, C., Petrie, W.D., Alphey, L. (2011): Field performance of engineered male mosquitoes. In: Nature Biotechnology 29(11), S 1034–1037

Hart Research Associates (2013): Awareness & impressions of synthetic biology. A report of findings based on a national survey among adults. Conducted on behalf of: Synthetic Biology Projekt, The Woodrow Wilson International Center For Scholars, 06.03.2013, Washington, D.C., www.synbioproject.org/site/assets/files/1061/synbiosurvey2013.pdf (19.11.2015)

Hart Research Associates (2014): Perceptions of synthetic biology and neural engineering. Key findings from qualitative research. Submitted to: The Woodrow Wilson International Center For Scholars, Synthetic Biological Project, 18.04.2014, Washington, D.C., www.synbioproject.org/site/assets/files/1073/focusgroup_2014.pdf (19.11.2015)

Hasunuma, T., Sanda, T., Yamada, R., Yoshimura, K., Ishii, J., Kondo, A. (2011): Metabolic pathway engineering based on metabolomics confers acetic and formic acid tolerance to a recombinant xylose-fermenting strain of Saccharomyces cerevisiae. In: Microbial Cell Factories 10(1), S. 2

Heemskerk, W., Schallig, H., Steenhuijsen Piters, B. de (2006): The world of Artemisia in 44 questions. The Royal Tropical Institute / Koninklijk Instituut voor de Tropen, o. O.

Heil, R., Coenen, C. (2013): Zukünfte menschlicher Natur: Biovisionäre Diskurse von der Eugenik bis zum Human Enhancement. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 22(1), S. 23–31

Heinrich, J.C., Scott, M.J. (2000): A repressible female-specific lethal genetic system for making transgenic insect strains suitable for a sterile-release program. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 97(15), S. 8229–8232

Heller, M.A., Eisenberg, R.S. (1998): Can patents deter innovation? The anticommons in biomedical research. In: Science 280(5364), S. 698–701

Henn, V. (2014): Papier statt Zellen – synthetische Biologie für den Alltag. In: Telepolis, 27.12.2014, www.heise.de/tp/artikel/43/43715/1.html (19.11.2015)

Hennen, L., Pfersdorf, S. (2014): Public engagement – promises, demands and fields of practice. Deliverable 2.1 of the project »Engage2020«. o. O., http://engage2020.eu/media/D2.1-Public-Engagement-Promises-demands-and-fields-of-practice.pdf (20.11.2015)

Herfst, S., Schrauwen, E.J., Linster, M., Chutinimitkul, S., Wit, E. de, Munster, V.J., Sorrell, E.M., Bestebroer, T.M., Burke, D.F., Smith, D.J., Rimmelzwaan, G.F. et al. (2012): Airborne transmission of influenza A/H5N1 virus between ferrets. In: Science 336(6088), S. 1534–1541

Hermann, B.G., Blok, K., Patel, M.K. (2007): Producing bio-based bulk chemicals using industrial biotechnology saves energy and combats climate change. In: Environmental Science & Technology 41(22), S. 7915–7921

Hermann, B.G., Debeer, L., Wilde, B.D., Blok, K., Patel, M.K. (2011): To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment. In: Polymer Degradation and Stability 96(6), S. 1159–1171

Hilgartner, S. (2012): Novel constitutions? New regimes of openness in synthetic biology. In: BioSocieties 7(2), S. 188–207

Hoffmann, A.A., Montgomery, B.L., Popovici, J., Iturbe-Ormaetxe, I., Johnson, P.H., Muzzi, F., Greenfield, M., Durkan, M., Leong, Y.S., Dong, Y., Cook, H. et al. (2011): Successful establishment of Wolbachia in Aedes populations to suppress dengue transmission. In: Nature 476(7361), S. 454–107

Hoppe, J. (2011): Sicherheitsaspekte der Lebenswissenschaften in der universitären Ausbildung in Deutschland. Research Group for Biological Arms Control, Carl Friedrich von Weizsäcker Centre for Science and Peace Research der Universität Hamburg, www.biological-arms-control.org/publications/2010BiosecurityUmfrage-Publikation-Final-Deutsch.pdf (20.11.2015)

Hotz, N., Wilcke, L., Weber, W. (2013): Design, synthesis, and application of stimulus-sensing biohybrid hydrogels. In: Macromolecular Rapid Communications 34(20), S. 1594–1610

Hove, S. van den, McGlade, J., Mottet, P., Depledge, M.H. (2012): The Innovation Union: A perfect means to confused ends? In: Environmental Science & Policy 16, S. 73–80

Hu, J.C., Coffin, R.S., Davis, C.J., Graham, N.J., Groves, N., Guest, P.J., Harrington, K.J., James, N.D., Love, C.A., McNeish, I., Medley, L.C. et al. (2006): A phase I study of OncoVEXGM-CSF, a second-generation oncolytic herpes simplex virus expressing granulocyte macrophage colony-stimulating factor. In: Clinic Cancer Research 12(22), S, 6737–6747

Hughes, T.P. (1986): The seamless web: Technology, science, etcetera, etcetera. In: Social Studies of Science 16, S. 281–292

Huynh, L., Tagkopoulos, I. (2014): Optimal part and module selection for synthetic gene circuit design automation. In: ACS Synthetic Biology 3(8), S. 556–564

Hwang, I.Y., Tan, M.H., Koh, E., Ho, C.L., Poh, C.L., Chang, M.W. (2013): Reprogramming microbes to be pathogen-seeking killers. In: ACS Synthetic Biology 3(4), S. 228–237

IAP (IAP – the global network of science academies) (2014): IAP Statement on realising global potential in synthetic biology: Scientific Opportunities and Good Governance. 07.05.2014, Trieste, www.interacademies.net/File.aspx?id=23974 (20.11.2015)

ICLS (International Council for the Life Sciences) (2013): Security aspects of synthetic biology. Meeting Report, 07–08.03., Hong Kong, http://synthetic-biology.net/wp-content/uploads/2013/10/icls_hongkong_meeting_report.pdf (20.11.2015)

Imai, M., Watanabe, T., Hatta, M., Das, S.C., Ozawa, M., Shinya, K., Zhong, G., Hanson, A., Katsura, H., Watanabe, S., Li, C. et al. (2012): Experimental adaptation of an influenza H5 haemagglutinin (HA) confers respiratory droplet transmission to a reassortant H5 HA/H1N1 virus in ferrets. In: Nature 486(7403), S. 420–428

IMS (Institute for Healthcare Informatics)(2012): The Global Use of Medicines: Outlook Through 2016. Report by the IMS Institute for Healthcare Informatics, Parsippany

IRGC (International Risk Governance Council) (2011): Guidelines for the appropriate risk governance of synthetic biology. Genf, www.irgc.org/IMG/pdf/irgc_SB_final_07jan_web.pdf (20.11.2015)

Isaacs, F.J., Carr, P.A., Wang, H.H., Lajoie, M.J., Sterling, B., Kraal, L., Tolonen, A.C., Gianoulis, T.A., Goodman, D.B., Reppas, N.B., Emig, C.J. et al. (2011): Precise manipulation of chromosomes in vivo enables genome-wide codon replacement. In: Science 333(6040), S. 348–353

Jackson, R., Ramshaw, I. (2010): The mousepox experience. An interview with Ronald Jackson and Ian Ramshaw on dual-use research. Interview by Michael J. Selgelid and Lorna Weir. In: EMBO Reports 11(1), S. 18–24

Jackson, R.J., Ramsay, A.J., Christensen, C.D., Beaton, S., Hall, D.F., Ramshaw, I.A. (2001): Expression of mouse interleukin-4 by a recombinant ectromelia virus suppresses cytolytic lymphocyte responses and overcomes genetic resistance to mousepox. In: Journal of Virology 75(3), S. 1205–1210

Jakociunas, T., Bonde, I., Herrgård, M., Harrison, S.J., Kristensen, M., Pedersen, L.E., Jensen, M.K., Keasling, J.D. (2015): Multiplex metabolic pathway engineering using CRISPR/Cas9 in Saccharomyces cerevisiae. In: Metabolic Engineering 28, S. 213–222

Jarboe, L.R., Zhang, X., Wang, X., Moore, J.C., Shanmugam, K.T., Ingram, L.O. (2010): Metabolic engineering for production of biorenewable fuels and chemicals: Contributions of synthetic biology. In: Journal of Biomedicine and Biotechnology 2010

Jasanoff, S. (2003): Technologies of humility: Citizen participation in governing science. In: Minerva 41(3), S. 223–244

Jefferson, C., Lentzos, F., Marris, C. (2014a): Synthetic biology and biosecurity: Challenging the myths. In: Frontiers of Public Health 2014(2), S. 115

Jefferson, C., Lentzos, F., Marris, C. (2014b): Synthetic biology and biosecurity: How scared should we be? Workshop Report. Department of Social Science, Health & Medicine, King's College London, www.kcl.ac.uk/sspp/departments/sshm/news/syn
biosecurity.aspx (20.11.2015)

Jefferson, R. (2006): Science as social enterprise: The CAMBIA BiOS Initiative. In: Innova*t*ions: Technology, Governance, Globalization 1(4), S. 13–44, www.bios.net/
daisy/bios/3067/version/default/part/AttachmentData/data/INNOV0104_pp13-44_innovations-in-practice_jefferson.pdf (20.11.2015)

Johnson, L., Shen, A., Boyle, L., Kunich, J., Pandey, K., Lemmon, M., Hermiston, T., Giedlin, M., McCormick, F., Fattaey, A. (2002): Selectively replicating adenoviruses targeting deregulated E2F activity are potent, systemic antitumor agents. In: Cancer Cell 1(4), S. 325–337

Joyce, G.F. (2012): Evolution. Toward an alternative biology. In: Science 336(6079), S. 307–308

Juhas, M., Eberl, L., Glass, J.I. (2011): Essence of life: Essential genes of minimal genomes. In: Trends in Cell Biology 21(10), S. 562–568

Kahan, D.M., Braman, D., Slovic, P., Gastil, J., Cohen, G. (2009): Cultural cognition of the risks and benefits of nanotechnology. In: Nature Nanotechnology 4(2), S. 87–90

Kaiser, J. (2014): Biosecurity. U.S. halts two dozen risky virus studies. In: Science 346(6208), S. 404

Kaiser, M. (2012): Commentary: Looking for conflict and finding none? In: Public Understanding of Science 21(2), S. 188–194

Kaltwasser, B. (2015): Ölpreis-Crash und die Folgen: Quo vadis Bioökonomie? In: transkript 21(3), S. 8–10

Kaplan, W., Laing, R. (2004): Priority medicines for Europe and the world. WHO/EDM/PAR/2004.7, World Health Organization, Department of Essential Drugs and Medicines Policy, Genf

Kar, S., Kar, S. (2010): Control of malaria. In: Nature Reviews Drug Discovery 9, S. 511–512

Karberg, S. (2012): Synthetische Biologie in der Kunst: Spiegel für die Forschung. In: genosphären 11, S. 12–13, www.markusschmidt.eu/wp-content/uploads/2012/03/Genos11_2012.pdf (20.11.2015)

Karberg, S. (2013a): Gene, die Bastelmasse der Biohacker. In: ZEIT Online, 04.05.2013, www.zeit.de/wissen/2013-05/gentechnik-biohacking (20.11.2015)

Karberg, S. (2013b): Was glüht denn da? In: Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung 20, 19.05.2013

Karberg, S. (2014a): Grenzen der Forschung. In: Der Tagesspiegel, 08.05.2014, S. 29

Karberg, S. (2014b): Dual use research on microbes: Biosafety, biosecurity, responsibility. Summary Report. Herrenhausen Symposium der VolkswagenStiftung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft, 10–12.12.2014, Hannover, www.volkswagenstiftung.de/dualuseresearch.html (20.11.2015)

Kastenhofer, K. (2013): Two sides of the same coin? The (techno)epistemic cultures of systems and synthetic biology. In: Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences 44(2), S. 130–140

Kay, M.A. (2011): State-of-the-art gene-based therapies: The road ahead. In: Nature Reviews Genetics 12, S. 316–328

Keasling, J.D. (2010): Manufacturing molecules through metabolic engineering. In: Science 330(6009), S. 1355–1358

Keasling, J.D., Chou, H. (2008): Metabolic engineering delivers next-generation biofuels. In: Nature Biotechnology 26(3), S. 298–299

Kemmer, C., Gitzinger, M., Daoud-El Baba, M., Djonov, V., Stelling, J., Fussenegger, M. (2010): Self-sufficient control of urate homeostasis in mice by a synthetic circuit. In: Nature Biotechnologoy 28(4), S. 355–360

Kera, D. (2012): Hackerspaces and DIYbio in Asia: Connecting science and community with open data, kits and protocols. In: Journal of Peer Production 2, http://peerpro duction.net/issues/issue-2/peer-reviewed-papers/diybio-in-asia/ (20.11.2015)

Keshavarz, T., Roy, I. (2010): Polyhydroxyalkanoates: Bioplastics with a green agenda. In: Current Opinion in Microbiology 13(3), S. 321–326

Khalil, A.S., Collins, J.J. (2010): Synthetic biology: Applications come of age. In: Nature Reviews Genetics 11(5), S. 367–379

Kindsmüller, K., Wagner, R. (2011): Synthetic biology: Impact on the design of innovative vaccines. In: Human Vaccines 7(6), S. 658–662

King, J.M., Digrazia, P.M., Applegate, B., Burlage, R., Sanseverino, J., Dunbar, P., Larimer, F., Sayler, G.S. (1990): Rapid, sensitive bioluminescent reporter technology for naphthalene exposure and biodegradation. In: Science 249(4670), S. 778–781

Kirn, D.H., Thorne, S.H. (2009): Targeted and armed oncolytic poxviruses: A novel multi-mechanistic therapeutic class for cancer. In: Nature Reviews Cancer 9(1), S. 64–71

KIT (Karlsruher Institut für Technologie) (2014): Freiheit und Verantwortung der Wissenschaft. Ethische Leitlinien des KIT im Einklang mit den aktuellen Empfehlungen von DFG und Leopoldina. Pressemitteilung 94, 27.06.2014, www.kit.edu/kit/pi_2014_15335.php (20.11.2015)

Kitney, R., Freemont, P. (2012): Synthetic biology – the state of play. In: FEBS Letters 586(15), S. 2029–2036

Klöckner, L. (2014): Eine Jury soll Bombenbauer und Giftmischer ausbremsen. In: ZEIT Online, 07.05.2014, www.zeit.de/wissen/gesundheit/2014-05/biosicherheit-stellungnahme-ethikrat (20.11.2015)

Knoshaug, E.P., Zhang, M. (2009): Butanol tolerance in a selection of microorganisms. In: Applied Biochemistry and Biotechnology 153(1–3), S. 13–20

Köchy, K., Hümpel, A. (Hg.) (2012): Synthetische Biologie. Entwicklung einer neuen Ingenieurbiologie? Themenband der interdisziplinären Arbeitsgruppe Gentechnologiebericht der BBAW, Dornburg

Köhler, V., Ward, T.R. (2010): Design of a functional nitric oxide reductase within a myoglobin scaffold. In: Chembiochem: A European Journal of Chemical Biology 11(8), S. 1049–1051

König, H., Frank, D., Heil, R., Coenen, C. (2013): Synthetic genomics and synthetic biology applications between hopes and concerns. In: Current Genomics 14(1), S. 11–24

König, H., Frank, D., Heil, R. (2014): Science, technology and the state: Implications for governance of synthetic biology and emerging technologies. In: Michalek, T., Hebáková, L., Hennen, L., Scherz, C., Nierling, L., Hahn, J. (Hg.): Technology assessment and policy areas of great transitions. Proceedings from the PACITA 2013 conference in Prague 13–15.03.2014, S. 315–320, www.pacitaproject.eu/wp-content/uploads/2014/11/Conference-Book.pdf (20.11.2105)

Kronberger, N. (2012): Synthetic biology: Taking a look at a field in the making. In: Public Understanding of Science 21(2), S. 130–133

Kronberger, N., Holtz, P., Kerbe, W., Strasser, E., Wagner, W. (2009): Communicating synthetic biology. In: Systems and Synthetic Biology 3(1–4), S. 19–26

Kronberger, N., Holtz, P., Wagner, W. (2012): Consequences of media information uptake and deliberation. In: Public Understanding of Science 21(2), S. 174–187

Kupecz, A. (2014): Who owns CRISPR-Cas9 in Europe? In: Nature Biotechnology 32(12), S. 1194–1196

Kupferschmidt, K. (2013): Influenza. Synthetic vaccine strain may speed up pandemic response. In: Science 340(6134), S. 797

Kurtz, S. (2005): Research is not terrorism: Steve Kurtz. In: The Arts Catalyst, 05.02.2005, www.artscatalyst.org/image/steve-kurtz-research-not-terrorism-april-2004 (20.11.2015)

Lacroix, R., McKemey, A.R., Raduan, N., Kwee Wee, L., Hong Ming, W., Guat Ney, T., Rahidah, A.A.S., Salman, S., Subramaniam, S., Nordin, O., Hanum, A.T.N. et al. (2012): Open field release of genetically engineered sterile male Aedes aegypti in Malaysia. In: PLoS One 7(8), S. e42771

Ladygina, N., Dedyukhina, E.G., Vainshtein, M.B. (2006): A review on microbial synthesis of hydrocarbons. In: Process Biochemistry 41, S. 1001–1014

Landrain, T. (2012): Do-it-yourself biology: Challenges and promises for an open science and technology movement. In: Systems and Synthetic Biology 7(3), S. 115–126

Lange, C.C., Wackett, L.P., Minton, K.W., Daly, M.J. (1998): Engineering a recombinant Deinococcus radiodurans for organopollutant degradation in radioactive mixed waste environments. In: Nature Biotechnology 16(10), S. 929–933

Lanphier, E., Urnov, F., Haecker, S.E., Werner, M., Smolenski, J. (2015): Don't edit the human germ line. In: Nature 519(7544), S. 410–411

Lara, A.R., Taymaz-Nikerel, H., Mashego, M.R., Gulik, W.M. van, Heijnen, J.J., Ramírez, O.T., Winden, V.A. van (2009): Fast dynamic response of the fermentative metabolism of Escherichia coli to aerobic and anaerobic glucose pulses. In: Biotechnology and Bioengineering 104(6), S. 1153–1161

Ledford, H. (2010): Garage biotech: Life hackers. In: Nature 467(7316), S. 650–652

Ledford, H. (2013): US regulation misses some GM crops. In: Nature 500(7463), S. 389–390

Lee, R.G., Petts, J. (2013): Adaptive governance for responsible innovation. In: Owen, R., Bessant, J., Heintz, M. (Hg.): Responsible innovation: Managing the responsible emergence of science and innovation in society. London, S. 143–164

Lee, S.K., Chou, H., Ham, T.S., Lee, T.S., Keasling, J.D. (2008): Metabolic engineering of microorganisms for biofuels production: From bugs to synthetic biology to fuels. In: Current Opinion in Biotechnology 19(6), S. 556–563

Leeuwen, B.N.M. van, Wulp, A.M. van der, Duijnstee, I., Maris, A.J.A. van, Straathof A.J.J. (2012): Fermentative production of isobutene. In: Applied Microbiology and Biotechnology 93(4), S. 1377–1387

Lehmkuhl, M. (2011): Die Repräsentation der synthetischen Biologie in der deutschen Presse. Abschlussbericht einer Inhaltsanalyse von 23 deutschen Pressetiteln, Berlin, www.ethikrat.org/dateien/pdf/lehmkuhl-studie-synthetische-biologie.pdf (20.11.2015)

Leibniz-Gemeinschaft (e. V.) (2012): Verhaltenskodex für Biosicherheit für Einrichtungen im Umgang mit biologischen Ressourcen. www.leibniz-gemeinschaft.de/fileadmin/user_upload/downloads/Presse/Dokumente/Verhaltenskodex_fuer_Biosicherheit_deutsch.pdf (20.11.2015)

Lempinen, E.W. (2011): FBI, AAAS collaborate on ambitious outreach to biotech researchers and DIY biologists. In: AAAS News, 01.04.2011, www.aaas.org/news/fbi-aaas-collaborate-ambitious-outreach-biotech-researchers-and-diy-biologists (20.11.2015)

Leopoldina (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. – Nationale Akademie der Wissenschaften) (2013): Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen. Stellungnahme. Halle (Saale)

Leopoldina (2015): Freiheit und Verantwortung der Wissenschaft: Rechtfertigen die Erfolgschancen von Forschung ihre potentiellen Risiken? Dokumentation des Symposiums der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, der Deutschen Forschungsgemeinschaft und des Deutschen Ethikrates am 3. November 2014 in Halle (Saale). Diskussion Nr. 4., Halle (Saale)

Leopoldina, acatech (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.), Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (e. V.) (2014): Zur Gestaltung der Kommunikation zwischen Wissenschaft, Öffentlichkeit und den Medien. Empfehlungen vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen. Berlin

Leopoldina, acatech, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (2015): Akademien nehmen Stellung zu Fortschritten der molekularen Züchtung und zum erwogenen nationalen Anbauverbot gentechnisch veränderter Pflanzen. 26.03.2015, www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2015-03-26_Ad-Hoc-Stellungnahme_Gruene_Gentechnik.pdf (20.11.2015)

Leopoldina, DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) (2015): »Gemeinsamer Ausschuss zum Umgang mit Sicherheitsrelevanter Forschung« nimmt die Arbeit auf. Gemeinsame Pressemitteilung der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). 19. 03.2015, www.leopoldina.org/de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/press/2296/ (20.11.2015)

Leopoldina, IfD Allensbach (Institut für Demoskopie Allensbach – Gesellschaft zum Studium der öffentlichen Meinung mbH) (2015): Die Synthetische Biologie in der öffentlichen Meinungsbildung. Überlegungen im Kontext der wissenschaftsbasierten Beratung von Politik und Öffentlichkeit. Diskussion Nr. 3., Halle (Saale)

Lerner, J., Tirole, J. (2005): The Economics of Technology Sharing: Open source and beyond. In: Journal of Economic Perspectives 19(2), S. 99–120

Li, H.J., Haurigot, V., Doyon, Y., Li, T.J., Wong, S.N.Y., Bhagwat, A.S., Malani, N., Anguela, X.M., Sharma, R., Ivanciu, L., Murphy, S.L. et al. (2011): In vivo genome editing restores haemostasis in a mouse model of haemophilia. In: Nature 475 (7355), S. 217–221

Li, H., Opgenorth, P.H., Wernick, D.G., Rogers, S., Wu, T.Y., Higashide, W., Malati, P., Huo, Y.X., Cho, K.M., Liao, J.C. (2012): Integrated electromicrobial conversion of $CO_2$ to higher alcohols. In: Science 335(6076), S. 1596

Liebert, W., Schmidt, J.C. (2010): Towards a prospective technology assessment: Challenges and requirements for technology assessment in the age of technoscience. In: Poiesis & Praxis 7(1), S. 99–116

Lillie, B. (2012): Do-it-yourself biotech: Ellen Jorgensen at TEDGlobal 2012. http://blog.ted.com/2012/06/26/do-it-yourself-biotech-ellen-jorgensen-at-tedglobal-2012

Lindner, M. (2007): Kunst im Gentech-Zoo. In: Gegenworte 9, S. 71–74

Linster, M., Boheemen, S. van, Graaf, M. de, Schrauwen, E.J., Lexmond, P., Manz, B., Bestebroer, T.M., Baumann, J., Riel, D. van, Rimmelzwaan, G.F., Osterhaus, A.D. et al. (2014): Identification, characterization, and natural selection of mutations driving airborne transmission of A/H5N1 virus. In: Cell 157(2), S. 329–339

Liu, B.L., Robinson, M., Han, Z.Q., Branston, R.H., English, C., Reay, P., McGrath, Y., Thomas, S.K., Thornton, M., Bullock, P., Love, C.A., Coffin, R.S. (2003): ICP34.5 deleted herpes simplex virus with enhanced oncolytic, immune stimulating, and anti-tumour properties. In: Gene Therapy 10(4), S. 292–303

Liu, T., Khosla, C. (2010): Chemistry. A balancing act for Taxol precursor pathways in E. coli. In: Science 330(6000), S. 44–45

Liu, T., Vora, H., Khosla, C. (2010): Quantitative analysis and engineering of fatty acid biosynthesis in E. coli. In: Metabolic Engineering 12(4), S. 378–386

Lloyd, J.R., Renshaw, J.C. (2005): Bioremediation of radioactive waste: Radionuclide-microbe interactions in laboratory and field-scale studies. In: Current Opinion in Biotechnolgy 16(3), S. 254–260

Lloyd's (Lloyd's Corp. London) (2009): Synthetic biology. Influencing development. Lloyd's Emerging Risks Team Report Version 1, www.lloyds.com/~/media/lloyds/reports/emerging%20risk%20reports/syntheticbiology_influencethedebate_july2009_v1.pdf (20.11.2015)

Looger, L.L., Dwyer, M.A., Smith, J.J., Hellinga, H.W. (2003): Computational design of receptor and sensor proteins with novel functions. In: Nature 423(6939), S. 185–190

Lu, T.K., Collins, J.J. (2007): Dispersing biofilms with engineered enzymatic bacteriophage. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 104(27), S. 11197–11202

Lu, T.K., Collins, J.J. (2009): Engineered bacteriophage targeting gene networks as adjuvants for antibiotic therapy. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 106(12), S. 4629–4634

Lusser, M., Parisi, C., Plan, D., Rodríguez-Cerezo, E. (2012): Deployment of new biotechnologies in plant breeding. In: Nature Biotechnology 30(3), S. 231–230

Maher, B. (2012): Bias accusation rattles US biosecurity board. In: Nature News, 14.04.2012, www.nature.com/news/bias-accusation-rattles-us-biosecurity-board-1.10454 (20.11.2015)

Maier, D.A., Brennan, A.L., Jiang, S., Binder-Scholl, G.K., Lee, G., Plesa, G., Zheng, Z., Cotte, J., Carpenito, C., Wood, T., Spratt, S.K. et al. (2013): Efficient clinical scale gene modification via zinc finger nuclease-targeted disruption of the HIV co-receptor CCR5. In: Human Gene Therapy 24(3), S. 245–258

Malakoff, D. (2013): Avian influenza. Critics skeptical as flu scientists argue for controversial H7N9 studies. In: Science 341(6146), S. 601

Malyshev, D.A., Dhami, K., Lavergne, T., Chen, T., Dai, N., Foster, J.M., Corrêa, I.R. Jr., Romesberg, F.E. (2014): A semi-synthetic organism with an expanded genetic alphabet. In: Nature 509(7500), S. 385–388

Mandell, D.J., Lajoie, M.J., Mee, M.T., Takeuchi, R., Kuznetsov, G., Norville, J.E., Gregg, C.J., Stoddard, B.L., Church, G.M. (2015): Biocontainment of genetically modified organisms by synthetic protein design. In: Nature 518(7537), S. 55–60

Mao, C., Flynn, C.E., Hayhurst, A. Sweeney, R., Qi, J., Georgiou, G., Iverson, B., Belcher, A.M. (2003): Viral assembly of oriented quantum dot nanowires. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 100(12), S. 6946–6951

Marliere, P. (2009): The farther, the safer: a manifesto for securely navigating synthetic species away from the old living world. In: Systems and Synthetic Biology 3(1–4), S. 77–84

Marliere, P. (2010): Production of alkenes by enzymatic decarboxylation of 3-hydroxyalkanoic acids. WIPO Patentanmeldung WO 2010/001078 A2, 07.01.2010, https://patentscope.wipo.int/search/en/WO2010001078 (25.11.2015)

Marris, C., Jefferson, C. (2013a): Workshop on »Synthetic biology: Containment and release of engineered micro-organisms« held on 29 April 2013 at King's College London. Scoping report. Centre for Synthetic Biology and Innovation (CSynBI), www.kcl.ac.uk/sspp/departments/sshm/research/csynbi-PDFs/Scoping-Report.pdf (20.11.2015)

Marris, C., Jefferson, C. (2013b): Workshop on »Synthetic biology: Containment and release of engineered micro-organisms« held on 29 April 2013 at King's College London. Summary of discussions. Centre for Synthetic Biology and Innovation (CSynBI), www.kcl.ac.uk/sspp/departments/sshm/research/csynbi-PDFs/Summary-of-Discussions.pdf (17.8.2015)

Marris, C., Rose, N. (2010): Open engagement: Exploring public participation in the biosciences. In: PLoS Biology 8(11), e1000549

Martin, V.J., Pitera, D.J., Withers, S.T., Newman, J.D., Keasling, J.D. (2003): Engineering a mevalonate pathway in Escherichia coli for production of terpenoids. In: Nature Biotechnology 21(7), S. 796–802

Martínez, I., Zhu, J., Lim, H., Bennett, G.N., San, K.Y. (2008): Replacing Escherichia coli NAD-dependent glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase (GAPDH) with a NADP-dependent enzyme from Clostridium acetobutylicum facilitates NADPH dependent pathways. In: Metabolic Engineering 10(6), S. 352–359

Maurer, S.M., Fischer, M., Schwer, H., Stähler, C., Stähler, P., Bernauer, H.S. (2009): Making commercial biology safer: What the gene synthesis industry has learned about screening customers and orders. Working Paper, Sept. 17, 2009, Goldman School of Public Policy and Boalt Law School, University of California, https://gspp.berkeley.edu/assets/uploads/page/Maurer_IASB_Screening.pdf (20.11.2015)

McEwen, J.T., Atsumi, S. (2012): Alternative biofuel production in non-natural hosts. In: Current Opinion in Biotechnology 23(5), S. 744–750

McNeely, K., Xu, Y., Bennette, N., Bryant, D.A., Dismukes, G.C. (2010): Redirecting reductant flux into hydrogen production via metabolic engineering of fermentative carbon metabolism in a cyanobacterium. In: Applied and Environmental Microbiology 76(15), S. 5032–5038

McNeil, D.G. (2014): White House to Cut Funding for Risky Biological Study. In: The New York Times, 18.10.2014, S. A3, www.nytimes.com/2014/10/18/us/white-house-to-cut-funding-for-risky-biological-study.html?_r=0

Meekings, K.N., Williams, C.S.M., Arrowsmith, J.E. (2012): Orphan drug development: An economically viable strategy for biopharma R&D. In: Drug Discovery Today 17(13–14), S. 660–664

Meer, J.R., Belkin, S. (2010): Where microbiology meets microengineering: Design and applications of reporter bacteria. In: Nature Review Microbiology 8(7), S. 511–522

Megharaj, M., Ramakrishnan, B., Venkateswarlu, K., Sethunathan, N., Naidu, R. (2011): Bioremediation approaches for organic pollutants: A critical perspective. Environment International 37(8), S. 1362–1375

Melgarejo, L., Andrioli, A.I. (2014): Technical opinion on examination request presented at the 171st Plenary Meeting of the National Technical Commission on Biosafety (CTNBio). Held on April 10th, 2014, http://aspta.org.br/wp-content/uploads/2014/08/Critical-vote-GM-Mosquito-jul2014.pdf (20.11.2015)

Melnikova, I. (2012): Rare diseases and orphan drugs. In: Nature Reviews Drug Discovery 11(4), S. 267–268

Mendez, M., Mayfield, S., O'Neill, B., Poon, Y., Lee, P., Behnke, C.A., Fang, S.-C. (2009): Molecule production by photosynthetic organisms. US Patentanmeldung US 2009/0280545 A1, 12.11.2009, www.google.com/patents/US20090280545(25.11.2015)

Meyer, M. (2012): Build your own lab: Do-it-yourself biology and the rise of citizen biotech-economies. In: Journal of Peer Production 2, http://peerproduction.net/issues/issue-2/invited-comments/build-your-own-lab/ (20.11.2015)

Meyer, R. (2010): Low-input intensification. Chances for small-scale farmers in developing countries. In: GAIA 19(4), S. 263–268

Meyer, R., Ratinger, T., Voss-Fels, K.P. (2013): Technology options for feeding 10 billion people. Plant breeding and innovative agriculture – final report. European Parliament, STOA – Science and Technology Options Assessment, Brüssel www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2013/513521/IPOL-JOIN_ET%282013%29513521_EN.pdf (20.11.2015)

Moe-Behrens, G.H.G., Davis, R., Haynes, K. (2013): Preparing sysnthetic bioloy for the World. In: Frontiers in Microbiology 4, Article 5, www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3554958/pdf/fmicb-04-00005.pdf (20.11.2015)

Mohammed, H., Vermaas, W. (2010): Reagents and methods for cyanobacterial production of bioplastics and biomaterials. US Patentschrift US 8465965 B2, 18.06.2013, www.google.com/patents/US8465965 (25.11.2015)

Molyneux-Hodgson, S., Meyer, M. (2009): Tales of Emergence – Synthetic Biology as a Scientific Community in the Making. In: BioSocieties 4(2–3), S. 129–145

Montague, M.G., Lartigue, C., Vashee, S. (2012): Synthetic genomics: Potential and limitations. In: Current Opinion in Biotechnology 23(5), S. 659–665

Morrissey, D., O'Sullivan, G.C., Tangney, M. (2010): Tumour targeting with systemically administered bacteria. In: Current Gene Therapy 10(1), S. 3–14

MPG (Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V.) (2010): Hinweise und Regeln der Max-Planck-Gesellschaft zum verantwortlichen Umgang mit Forschungsfreiheit und Forschungsrisiken. www.mpg.de/200127/Regeln_Forschungsfreiheit.pdf (20.11.2015)

Mueller, S., Coleman, J.R., Papamichail, D., Ward, C.B., Nimnual, A., Futcher, B., Skiena, S., Wimmer, E. (2010): Live attenuated influenza virus vaccines by computer-aided rational design. In: Nature Biotechnology 28(7), S. 723–726

Müller-Jung, J. (2012): Und nun die Virenvorhersage. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 07.03.2012, www.faz.net/aktuell/feuilleton/buecher/rezensionen/sachbuch/nathan-wolfe-virus-und-nun-die-virenvorhersage-11675345.html (20.11.2015)

Müller-Röber, B., Budisa, N., Diekämper, J., Domasch, S., Fehse, B., Hampel, J., Hucho, F., Hümpel, A., Köchy, K., Marx-Stölting, L., Reich, J., Rheinberger, H.-J., Ropers, H.-H., Taupitz, J., Walter, J., Zenke, M. (Hg.) (2015): Dritter Gentechnologiebericht. Analyse einer Hochtechnologie. Baden-Baden

Mumford, J.D. (2012): Science, regulation, and precedent for genetically modified insects. In: PLoS Neglected Tropical Diseases 6(1), S. e1504

Murray, F., Stern, S. (2007): Do formal intellectual property rights hinder the free flow of scientific knowledge? An empirical test of the anti-commons hypothesis. In: Journal of Economic Behavior & Organization 63(4), S. 648–687

Mussolino, C., Cathomen, T. (2013): RNA guides genome engineering. In: Nature Biotechnology 31(3), S. 208–209

Nascimento, S., Pereira, A.G., Ghezzi, A. (2014): From citizen science to do it yourself science. An annotated account of an on-going movement. In: European Commission Joint Research Center – Sciene and Policy Reports, http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC93942/ldna27095enn.pdf (20.11.2015)

Nature (2010): Garage biology (Editorial). In: Nature 467(7316), S. 634

Nature (2011): Letting the bugs out of the bag (Editorial). In: Nature 470(7333), S. 139

Nature (2013): The DIY dilemma. Misconceptions about do-it-yourself biology mean that opportunities are being missed (Editorial). In: Nature 503(7477), S. 437–438

NEST High-Level Expert Group (NEST – New and Energing Science and Technology – a research activity under the European Community's 6th Framework Programme) (2005): Synthetic biology. Applying engineering to biology. Report of a NEST High-Level Expert Group, Brüssel, ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nest/docs/synthe ticbiology_b5_eur21796_en.pdf (20.11.2015)

Neumann, H., Wang, K., Davis, L., Garcia-Alai, M., Chin, J.W. (2010): Encoding multiple unnatural amino acids via evolution of a quadruplet-decoding ribosome. In: Nature 464(7287), S. 441–444

Nguyen, V.H., Kim, H.S., Ha, J.M., Hong, Y., Choy, H.E., Min, J.J. (2010): Genetically engineered Salmonella typhimurium as an imageable therapeutic probe for cancer. In: Cancer Research 70(1), S. 18–23

Nielsen, J., Keasling, J.D. (2011): Synergies between synthetic biology and metabolic engineering. In: Nature Biotechnology 29(8), S. 693–695

Nielsen, L.K. (2011): From retrofitting to green field. In: Nature Chemical Biology 7(7), S. 408–409

Niu, Y., Shen, B., Cui, Y., Chen, Y., Wang, J., Wang, L., Kang, Y., Zhao, X., Si, W., Li, W., Xiang, A. et al. (2014): Generation of gene-modified cynomolgus monkey via Cas9/RNA-mediated gene targeting in one-cell embryos. In: Cell 156(4), S. 836–843

Nölling, J., Breton, G., Omelchenko, M.V., Makarova, K.S., Zeng, Q., Gibson, R., Lee, H.M., Dubois, J., Qiu, D., Hitti, J., GTC Sequencing Center Production Finishing et al. (2001): Genome sequence and comparative analysis of the solvent-producing bacterium Clostridium acetobutylicum. In: Journal of Bacteriology 183(16), S. 4823–4838

Noorden, R. van (2010): Demand for malaria drug soars. In: Nature 466(7307), S. 672–673

Nordmann, A. (2011): Was wissen die Technowissenschaften? In: Gethmann, C.F. (Hg.): Lebenswelt und Wissenschaft. Hamburg, S. 566–579

NRC (National Research Council of the National Academies) (2004): Biotechnology research in an age of terrorism. Washington, D.C.

NRC (2006): Globalization, biosecurity, and the future of the life sciences. Washington, D.C.

NSABB (National Science Advisory Board for Biosecurity) (2006): Addressing biosecurity concerns related to the synthesis of select agents. http://osp.od.nih.gov/sites/default/files/resources/Final_NSABB_Report_on_Synthetic_Genomics.pdf (20.11.2015)

NSABB (2012): Findings and Recommendations. 29–30.03.2012, www.nih.gov/sites/default/files/about-nih/nih-director/statements/collins/03302012_NSABB_Recommendations.pdf (20.11.2015)

Nuffield Council on Bioethics (2012): Emerging biotechnologies: Technology, choice and the public good. London, http://nuffieldbioethics.org/wp-content/uploads/2014/07/Emerging_biotechnologies_full_report_web_0.pdf (20.11.2015)

Ober, S. (2014a): Was ist Bioökonomie? Bundesregierung und EU setzen auf biobasierte Industrie. In: Rundbrief Forum Umwelt & Entwicklung (4), S. 2–4

Ober, S. (2014b): Partizipation in der Wissenschaft. Zum Verhältnis von Forschungspolitik und Zivilgesellschaft am Beispiel der Hightech-Strategie. München

OECD (Organisation for for Economic Co-operation and Development) (2011): Future prospects for industrial biotechnology. Paris, http://dx.doi.org/10.1787/9789264126633-en (20.11.2015)

OECD (2014): Emerging policy issues in synthetic biology. Paris, www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/emerging-policy-issues-in-synthetic-biology_9789264208421-en (20.11.2015)

O'Reilly, M., Kohn, D.B., Bartlett, J., Benson, J.M., Brooks, P., Byrne, B., Cammozi, C., Cornetta, K., Crystal, R., Fong, Y. (2013): Gene therapy for rare diseases: Summary of a National Institutes of Health workshop. September 13, 2012. In: Human Gene Therapy 24(4), S. 355–362

Osborn, M.J., Starker, C.G., McElroy, A.N., Webber, B.R., Riddle, M.J., Xia, L., Defeo, A.P., Gabriel, R., Schmidt, M., Kalle, C. von, Carlson, D.F. et al. (2013): TALEN-based gene correction for epidermolysis bullosa. In: Molecular Therapy: The Journal of the American Society of Gene Therapy 21(6), S. 1151–1159

Oudheusden, M. van (2014): Where are the politics in responsible innovation? European governance, technology assessments, and beyond. In: Journal of Responsible Innovation 1(1), S. 67–86

Owen, R., Macnaghten, P., Stilgoe, J. (2012): Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society. In: Science and Public Policy 39(6), S. 751–760

Owen, R., Stilgoe, J., Macnaghten, P., Gorman, M., Fisher, E., Guston, D. (2013): A Framework for responsible innovation. In: Owen, R., Bessant, J., Heintz, M. (Hg.): Responsible Innovation: Managing the Responsible Emergence of Science and Innovation in Society. London, S. 27–50

Oxitec (Oxitec Ltd.) (2011): Brazil trials under way. In: Oxitec Newsletter June 2011, www.oxitec.com/june-2011-newsletter/ (20.11.2015)

Oye, K.A., Esvelt, K., Appleton, E., Catteruccia, F., Church, G., Kuiken, T., Lightfoot, S.B., McNamara, J., Smidler, A., Collins, J.P. (2014): Regulating gene drives. In: Science 345(6197), S. 626–628

Paddon, C.J., Westfall, P.J., Pitera, D.J., Benjamin, K., Fisher, K., McPhee, D., Leavell, M.D., Tai, A., Main, A., Eng, D., Polichuk, D.R. et al. (2013): High-level semi-synthetic production of the potent antimalarial artemisinin. In: Nature 496(7446), S. 528–532

Pamlin, D., Armstrong, S., Baum, S. (2015): Global Challenges. 12 Risks that threaten human civilisation. The case for a new risk category. http://globalchallenges.org/wp-content/uploads/12-Risks-with-infinite-impact.pdf (20.11.2015)

Pardee, K., Green, A.A., Ferrante, T., Cameron, D.E., DaleyKeyser, A., Yin, P., Collins, J.J. (2014): Paper-based synthetic gene networks. In: Cell 159(4), S. 940–954

Patel, M.R., Kratzke, R.A. (2013): Oncolytic virus therapy for cancer: The first wave of translational clinical trials. In: Translational Research: The Journal of Laboratory and Clinical Medicine 161(4), S. 355–364

PATH (Program for Appropriate Technology in Health) (2013): Sanofi and PATH announce the launch of large-scale production of semisynthetic artemisinin against malaria. Press release, 11.04.2013, www.path.org/news/press-room/422/ (20.11.2015)

Pauwels, E., Ifrim, I. (2008): Trends in American and European press coverage of synthetic biology. Tracking the last five years of coverage. In: Woodrow Wilson International Center for Scholars, Synthetic Biology Project, Synbio 1/November 2008, www.synbioproject.org/process/assets/files/5999/synbio1final.pdf (20.11.2015)

Pauwels, E., Lovell, A., Rouge, E. (2012): Trends in American and European press coverage of synthetic biology. Tracking the years 2008–2011. In: Woodrow Wilson International Center for Scholars, Synthetic Biology Project, Synbio 4/December 2012, www.wilsoncenter.org/sites/default/files/synbio_press_final.pdf (20.11.2015)

Pauwels, K., Mampuys, R., Golstein, C., Breyer, D., Herman, P., Kaspari, M., Pagès, J.-C., Pfister, H., Wilk, F. van der, Schönig, B. (2013): Event report: SynBio Workshop (Paris 2012) – Risk assessment challenges of Synthetic Biology. In: Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit 8(3), S. 215–226

PCSBI (Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues) (2010a): New directions. The ethics of synthetic biology and emerging technologies. Washington, D.C.

PCSBI (2010b): Transcript: Meeting 2, Session 7. Biosecurity and Biosafety. 14.09.2010, Philadelphia, http://bioethics.gov/node/177 (20.11.2015)

Pentecost, C. (2008): Outfitting the laboratory of the symbolic: Toward a critical inventory of bioart. In: Costa/Philip 2008, S. 107–123

Peplow, M. (2013): Malaria drug made in yeast causes market ferment. In: Nature 494(7436), S. 160–161

Peralta-Yahya, P.P., Zhang, F., Cardayre, S.B. del, Keasling, J.D. (2012): Microbial engineering for the production of advanced biofuels. In: Nature 488(7411), S. 320–328

Phuc, H.K., Andreasen, M.H., Burton, R.S., Vass, C., Epton, M.J., Pape, G., Fu, G., Condon, K.C., Scaife, S., Donnelly, C.A., Coleman, P.G. et al. (2007): Late-acting dominant lethal genetic systems and mosquito control. In: BMC Biology 5, S. 11

Pinheiro, V.B., Taylor, A.I., Cozens, C., Abramov, M., Renders, M., Zhang, S., Chaput, J.C., Wengel, J., Peak-Chew, S.Y., McLaughlin, S.H., Herdewijn, P., Holliger, P. (2012): Synthetic genetic polymers capable of heredity and evolution. In: Science 336(6079), S. 341–344

Polanyi, M. (1951): The logic of liberty. Chicago

Prindle, A., Samayoa, P., Razinkov, I., Danino, T., Tsimring, L.S., Hasty, J. (2012): A sensing array of radically coupled genetic »biopixels«. In: Nature 481(7379), S. 39–44

Pühler, A., Müller-Röber, B., Weitze, M.-D. (Hg.) (2011): Synthetische Biologie. Die Geburt einer neuen Technikwissenschaft. acatech Diskussion, Berlin

Rabaey, K., Girguis, P., Nielsen, L.K. (2011): Metabolic and practical considerations on microbial electrosynthesis. In: Current Opinion in Biotechnology 22(3), S. 371–377

Rabinow, P., Bennett, G. (2009): Synthetic biology: Ethical ramifications 2009. In: Systems and Synthetic Biology 3(1–4), S. 99–108

Radakovits, R., Jinkerson, R.E., Darzins, A., Posewitz, M.C. (2010): Genetic engineering of algae for enhanced biofuel production. In: Eukaryotic Cell 9(4), S. 486–501

RAE (The Royal Academy of Engineering) (2009a): Synthetic Biology: Scope, applications and implications. London

RAE (2009b): Synthetic Biology: Public dialogue on synthetic biology. London

Ramos, J.L., Marqués, S., Dillewijn, P. van, Espinosa-Urgel, M., Segura, A., Duque, E., Krell, T., Ramos-Gonzalez, M.I., Bursakov, S., Roca, A., Solano, J. et al. (2011): Laboratory research aimed at closing the gaps in microbial bioremediation. In: Trends in Biotechnology 29(12), S. 641–647

Rappuoli, R., Dormitzer, P.R. (2012): Influenza: Options to improve pandemic preparation. In: Science 336(6088), S. 1531–1533

Rasgon, J.L. (2011): Dengue fever: Mosquitoes attacked from within. In: Nature 476(7361), S. 407–408

Rehmann, M.S., Kloxin, A.M. (2013): Tunable and dynamic soft materials for three-dimensional cell culture. In: Soft Matter 9(29), S. 6737–6746

Reeves, R.G., Denton, J.A., Santucci, F., Bryk, J., Reed, F.A. (2012): Scientific standards and the regulation of genetically modified insects. In: PLoS Neglected Tropical Diseases 6(1), S. e1502

Regalado, A. (2012): Doing biotech in my bedroom. In: MIT Technology Review. Business Report, The Youth Effect, Februar 2012, www.technologyreview.com/news/426885/doing-biotech-in-my-bedroom/ (20.11.2015)

Reichow, A., Bowman, D.M. (2015): Roles of NGOs in the governance of nanomaterials. In: Bowman, D., Dijkstra, A., Fautz, C., Guivant, J., Konrad, K., Lente, H. von, Woll, S. (Hg.): SNET series. Unveröffentlicht

Renninger, N., Knopp, R., Nitsche, H., Clark, D.S., Keasling, J.D. (2004): Uranyl precipitation by Pseudomonas aeruginosa via controlled polyphosphate metabolism. In: Applied and Environmental Microbiology 70(12), S. 7404–7412

Renninger, N.S., McPhee, D.J. (2008): Fuel compositions comprising farnesane and farnesane derivatives and method of making and using same. WIPO Patentanmeldung WO/2008/045555 A2, 17.04.2008, https://patentscope.wipo.int/search/en/WO2008045555 (25.11.2015)

Reppas, N.B., Ridley, C.P. (2010): Methods and compositions for the recombinant biosynthesis of n-alkanes. US Patentschrift US 7794969 B1, 14.09.2010, www.google.com/patents/US7794969 (25.11.2015)

Rerimassie, V., Stemerding, D. (2012): Politiek over Leven. In Debat over synthetische Biologie. Rathenau Instituut, Den Haag

Revill, J., Jefferson, C. (2014): Tacit knowledge and the biological weapons regime. In: Science And Public Policy 41(5), S. 597–610

Ribarits, A., Stepanek, W., Wögerbauer, M., Peterseil, V., Kuffner, M., Topitschnig, C., Brüller, W., Hochegger, R., Gansberger, M., Widhalm, I., Leonhardt, C. (2014): Synthetic Biology. Bundesministerium für Gesundheit, Wien

Rip, A. (2014): The past and future of RRI. In: Life Sciences, Society and Policy 10, S. 17, www.lsspjournal.com/content/pdf/s40504-014-0017-4.pdf (23.11.2015)

Ripp, S., Nivens, D.E., Ahn, Y., Werner, C., Jarrell, J.IV., Easter, J.P., Cox, C.D., Burlage, R.S., Sayler, G.S. (2000): Controlled field release of a bioluminescent genetically engineered microorganism for bioremediation process monitoring and control. In: Environmental Science and Technology 34(5), S. 846–853

Ro, D.K., Paradise, E.M., Ouellet, M., Fisher, K.J., Newman, K.L., Ndungu, J.M., Ho, K.A., Eachus, R.A., Ham, T.S., Kirby, J., Chang, M.C. et al. (2006): Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast. In: Nature 440(7086), S. 940–943

Robertson, D.E., Jacobson, S.A., Morgan, F., Berry, D., Church, G.M., Afeyan, N.B. (2011): A new dawn for industrial photosynthesis. In: Photosynthesis Research 107(3), S. 269–277

Rojo, F., Pieper, D.H., Engesser, K.H., Knackmuss, H.J., Timmis, K.N. (1987): Assemblage of ortho cleavage route for simultaneous degradation of chloro- and methylaromatics. In: Science 238(4832), S. 1395–1398

Rovner, A.J., Haimovich, A.D., Katz, S.R., Li, Z., Grome, M.W., Gassaway, B.M., Amiram, M., Patel, J.R., Gallagher, R.R., Rinehart, J., Isaacs, F.J. (2015): Recoded organisms engineered to depend on synthetic amino acids. In: Nature 518(7537), S. 89–93

Royo, J.L., Becker, P.D., Camacho, E.M., Cebolla, A., Link, C., Santero, E., Guzmán, C.A. (2007): In vivo gene regulation in Salmonella spp. by a salicylate-dependent control circuit. In: Nature Methods 4(11), S. 937–942

Rude, M.A., Schirmer, A. (2009): New microbial fuels: A biotech perspective. In: Current Opinion in Microbiology 12(3), S. 274–281

Ruder, W.C., Lu, T., Collins, J.J. (2011): Synthetic biology moving into the clinic. In: Science 333(6047), S. 1248–1252

Russell, C.A., Fonville, J.M., Brown, A.E., Burke, D.F., Smith, D.L., James, S.L., Herfst, S., Boheemen, S. van, Linster, M., Schrauwen, E.J., Katzelnick, L. et al. (2012): The potential for respiratory droplet-transmissible A/H5N1 influenza virus to evolve in a mammalian host. In: Science 336(6088), S. 1541–1547

Saeidi, N., Wong, C.K., Lo, T.M., Nguyen, H.X., Ling, H., Leong, S.S., Poh, C.L., Chang, M.W. (2011): Engineering microbes to sense and eradicate Pseudomonas aeruginosa, a human pathogen. In: Molecular Systems Biology (7), S. 521

Sample, I. (2011): How do synthetic biologists keep the support of the public? In: The Guardian Online, 14.04.2011, www.theguardian.com/science/blog/2011/apr/14/synthetic-biology-pathogens-china (20.11.2015)

Sanchez, A.M., Andrews, J., Hussein, I., Bennett, G.N., San, K.Y. (2006): Effect of overexpression of a soluble pyridine nucleotide transhydrogenase (UdhA) on the production of poly(3-hydroxybutyrate) in Escherichia coli. In: Biotechnology Progress 22(2), S. 420–425

Sarikaya, M., Tamerler, C., Jen, A.K., Schulten, K., Baneyx, F. (2003): Molecular biomimetics: Nanotechnology through biology. In: Nature Materials 2(9), S. 577–585

Sauter, A. (2005): Grüne Gentechnik? – Folgenabschätzung der Agrobiotechnologie. In: Petermann, T., Grunwald, A. (Hg.): Technikfolgen-Abschätzung für den Deutschen Bundestag. Das TAB – Erfahrungen und Perspektiven wissenschaftlicher Politikberatung. Berlin, S. 116–146

Sauter, A. (2011): Synthetische Biologie. Finale Technisierung des Lebens – oder Etikettenschwindel? In: TAB-Brief Nr. 39, S. 23–30

Sauter, A. (2013): Frickler, Gründer, Bürgerforscher? In: Gen-ethischer Informationsdienst (GID) 221, S. 18–21

SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks), SCCS (Scientific Committee on Consumer Safety), SCHER (Scientific Committee on Health and Environmental Risks) (2014): Mandate as approved by SCENIHR Plenary on 26/02/2014. o. O., http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/docs/synthetic_biology_mandate_en.pdf?utm_source=feedly (20.11.2015)

SCHER, SCENIHR, SCCS (2014a): Preliminary Opinion on Synthetic Biology I: Definition. European Union, o. O.

SCHER, SCENIHR, SCCS (2014b): Preliminary Opinion on Synthetic Biology II: Risk assessment methodologies and safety aspects. European Union, o. O.

Scherer, K., Herzog, R. (2014): Im Visier der Hacker. Dokumentarfilm, Norddeutscher Rundfunk. Erstausstrahlung 14.07.2014, ARD

Schirmer, A., Rude, M.A., Li, X., Popova, E., Cardayre, S.B. del (2010): Microbial biosynthesis of alkanes. In: Science 329(5991), S. 559–562

Schlichter, A., Karberg, S. (2012): Die Gen-Köche. In: Bayerisches Fernsehen, Erstausstrahlung 07.05.2013

Schmidt, M. (2010): Xenobiology: A new form of life as the ultimate biosafety tool. In: Bioessays: News and Reviews in Molecular, Cellular and Developmental Biology 32(4), S. 322–331

Schmidt, M., Giersch, G. (2011): DNA synthesis and security. In: Campbell, M.J. (Hg.) (2011): DNA microarrays, synthesis and synthetic DNA. o. O., www.markusschmidt.eu/pdf/NOVA-Schmidt-print.pdf (23.11.2015)

Schmidt, M., Lorenzo, V. de (2012): Synthetic constructs in/for the environment: managing the interplay between natural and engineered biology. In: FEBS Letters 586(15), S. 2199–2206

Schmidt, M., Kelle, A., Ganguli-Mitra, A., Vriend, H. de (Hg.) (2009): Synthetic biology: The technoscience and its societal consequences. Dordrecht u. a. O.

Schmidt, M., Radchuk, O., Meinhart, C. (2014): A serious game for public engagement in synthetic biology. In: Göbel, S., Wiemeyer, J. (Hg.): Games for training, education, health and sports. Proceedings of the 4th International Conference on Serious Games, GameDays 2014, Darmstadt, April 1-5, 2014. Heidelberg, S. 77–85

Schmidt, M., Torgersen, H., Ganguli-Mitra, A., Kelle, A., Deplazes, A., Biller-Andorno, N. (2008): SYNBIOSAFE e-conference: Online community discussion on the societal aspects of synthetic biology. In: Systems and Synthetic Biology 2(1–2), S. 7–17

Schmitt, H. (2011): Bakterien und Pilze haben keine Lobby. Gentechnisch veränderte Mikroorganismen und ihre Akzeptanz in der Lebensmittelproduktion. PoNa-Paper Nr. 3, Lüneburg, www2.leuphana.de/pona-eu/data/Downloads/PoNa-Paper3_fertig.pdf (23.11.2015)

Schmoch, U. (2007): Double-boom cycles and the comeback of science-push and market-pull. In: Research Policy 36(7), S. 1000–1015

Schomberg, R. von (2012): Prospects for technology assessment in a framework of responsible research and innovation. In: Dusseldorp, M., Beecroft, R. (Hg.): Technikfolgen abschätzen lehren. Bildungspotenziale transdisziplinärer Methoden. Wiesbaden, S. 39–61

Schummer, J. (2011): Das Gotteshandwerk. Die künstliche Herstellung von Leben im Labor. Berlin

Service, R.F. (2011): Algae's second try. In: Science 333(6047), S. 1238–1239

Seyfried, G., Pei, L., Schmidt, M. (2014): European do-it-yourself (DIY) biology: Beyond the hope, hype and horror. In: BioEssays: News and reviews in molecular, cellular and developmental biology 36(6), S. 548–551

Shin, H.J. (2011): Genetically engineered microbial biosensors for in situ monitoring of environmental pollution. In: Applied Microbiology and Biotechnology 89(4), S. 867–877

Shinto, H., Tashiro, Y., Kobayashi, G., Sekiguchi, T., Hanai, T., Kuriya, Y., Okamoto, M., Sonomoto, K. (2008): Kinetic study of substrate dependency for higher butanol production in acetone-butanol-ethanol fermentation. In: Process Biochemistry 43(12), S. 1452–1461

Siegfried, K., Endes, C., Bhuiyan, A.F., Kuppardt, A., Mattusch, J., Meer, J.R. van der, Chatzinotas, A., Harms, H. (2012): Field testing of arsenic in groundwater samples of Bangladesh using a test kit based on lyophilized bioreporter bacteria. In: Environmental Science and Technology 46(6), S. 3281–3287

Singh, A., Kuhad, R.C., Ward, O.P. (Hg.) (2009): Biological remediation of soil: An overview of global market and available technologies. Berlin/Heidelberg

Singh, J.S., Abhilash, P.C., Singh, H.B., Singh, R.P., Singh, D.P. (2011): Genetically engineered bacteria: An emerging tool for environmental remediation and future research perspectives. In: Gene 480(1–2), S. 1–9

Sinha, J., Reyes, S.J., Gallivan, J.P. (2010): Reprogramming bacteria to seek and destroy an herbicide. In: Nature Chemical Biology 6(6), S. 464–470

Smith, R. (2012): Why a macroeconomic perspective is critical to the prevention of noncommunicable disease. In: Science 337(6101), S. 1501–1503

Somleva, M.N., Snell, K.D., Beaulieu, J.J., Peoples, O.P., Garrison, B.R., Patterson, N.A. (2008): Production of polyhydroxybutyrate in switchgrass, a value-added co-product in an important lignocellulosic biomass crop. In: Plant Biotechnology Journal 6(7), S. 663–678

Sonnenburg, J.L. (2015): Microbiome Engineering. In: Nature 518(7540), S. S10-S13

Soong, R.K., Bachand, G.D., Neves, H.P., Olkhovets, A.G., Craighead, H.G., Montemagno, C.D. (2000): Powering an inorganic nanodevice with a biomolecular motor. In: Science 290(5496), S. 1555–1558

Spieker, M. (Hg.) (2013): Gute Lebenswissenschaft für das 21. Jahrhundert. Memorandum des Tutzinger Diskurses, Akademie für Politische Bildung, Tutzing

Steen, E.J., Kang, Y., Bokinsky, G., Hu, Z., Schirmer, A., McClure, A., Del Cardayre, S.B., Keasling, J.D. (2010): Microbial production of fatty-acid-derived fuels and chemicals from plant biomass. In: Nature 463(7280), S. 559–562

Steinbrecher, R.A. (2010): Scientific opinion to the Department of Biosafety, Ministery of Natural Resources and Environment of Malaysia. www.econexus.info/sites/econexus/files/RSt%20-%20NRE(S)%20609-2-1%20submission%20edDec2010-1.pdf (23.11.2015)

Stemerding, D., Rerimassie, V. (2013): Ethics debates on synthetic biology in the EU. Report representing Deliverable 5.1 for Global Ethics in Science & Technology (GEST), o. O., www.uclan.ac.uk/research/explore/projects/assets/cpe_gest_D5-1.pdf (23.11.2015)

Stemerding, D., Vriend, H. de, Walhout, B., Est, R. van (2010): Synthetic biology and the role of civil society organizations. In: Schmidt et al. 2009, S. 155–176

Sterling, B. (2012): Bio/Hardware hacking. In: The Journal of Peer Production 2, 07.03.2012, www.wired.com/2012/07/the-journal-of-peer-production-issue-2-biohardware-hacking/ (23.11.2015)

Stilgoe, J., Owen, R., Macnaghten, P. (2013): Developing a framework for responsible innovation. In: Research Policy 42(9), S. 1568–1580

Suk, J.E., Zmorzynska, A., Hunger, I., Biederbick, W., Sasse, J., Maidhof, H., Semenza, J.C. (2011): Dual-use research and technological diffusion: Reconsidering the bioterrorism threat spectrum. In: PLoS Pathogens 7(1), S. e1001253

Sukhdev, P. (2012): Sustainability: The corporate climate overhaul. In: Nature 486(7401), S. 27–28

Sullivan, M. (2014): Cambrian Genomics CEO says his company just raised $10M to »print more DNA«. In: Venturebeat, 20.11.2014, http://venturebeat.com/2014/1120/cambrian-genomics-ceo-says-his-company-just-raised-10m-to-print-more-dna/ (23.11.2015)

Sutcliffe, H. (2011): A report on Responsible Research and Innovation. MATTER, o. O.

Sutton, T.C., Finch, C., Shao, H., Angel, M., Chen, H., Capua, I., Cattoli, G., Monne, I., Perez, D.R. (2014): Airborne transmission of highly pathogenic H7N1 influenza virus in ferrets. In: Journal of Virology 88(12), S. 6623–6635

Synberc (Synthetic Biology Engineering Research Center) (2014): Sustainability initiative. Initial findings and recommendations. o. O., http://nancyjkelley.com/wp-content/uploads/Final-Synberc-Sustainability-Report.pdf (23.11.2015)

Szostak, J.W., Bartel, D.P., Luisi, P.L. (2001): Synthesizing life. In: Nature 409(6818), S. 387–390

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (1999): Gentechnik, Züchtung und Biodiversität (Autoren: Meyer, R., Revermann, C. Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 55, Bonn

TAB (2000): Risikoabschätzung und Nachzulassungs-Monitoring transgener Pflanzen (Autoren: Sauter, A., Meyer, R.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 68, Berlin

TAB (2004): Partizipative Verfahren der Technikfolgen-Abschätzung und parlamentarische Politikberatung (Autoren: Hennen, L., Petermann. T., Scherz, C.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 96, Berlin

TAB (2005): Grüne Gentechnik – Transgene Pflanzen der 2. und 3. Generation (Autor: Sauter, A., unter Mitarbeit von Hüsing, B.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 104, Berlin

TAB (2007): Chancen und Herausforderungen neuer Energiepflanzen. Basisanalysen (Autoren: Meyer, R., Grunwald, A., Rösch, C., Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 121, Berlin

TAB (2008a): Konvergierende Technologien und Wissenschaften. Der Stand der Debatte und politischen Aktivitäten zu »Converging Technologies« (Autor: Coenen, C.). TAB-Hintergrundpapier Nr. 16, Berlin

TAB (2008b): Transgenes Saatgut in Entwicklungsländern – Erfahrungen, Herausforderungen, Perspektiven (Autor: Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 128, Berlin

TAB (2009): Biomedizinische Innovationen und klinische Forschung (Autoren: Bührlen, B., Vollmar, C.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 132, Berlin

TAB (2010): Chancen und Herausforderungen neuer Energiepflanzen (Autoren: Meyer, R., Rösch, C., Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 136, Berlin

TAB (2011): Forschung zur Lösung des Welternährungsproblems – Ansatzpunkte, Strategien, Umsetzung (Autoren: Dusseldorp, M., Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 142, Berlin

TAB (2012a): Ökologischer Landbau und Biomasseerzeugung – Zielkonflikte und Lösungsansätze (Autoren: Meyer, R., Priefer, C.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 151, Berlin

TAB (2012b): Technische Optionen zum Management des $CO_2$-Kreislaufs (Autoren: Caviezel, C., Grünwald, R.). TAB-Hintergrundpapier Nr. 18, Berlin

TAB (2014a): Big Data in der Cloud. TA-Vorstudie (Autoren: Leimbach, T., Bachlechner, D.). TAB-Hintergrundpapier Nr. 19, Berlin

TAB (2014b): Offene Innovationsprozesse als Cloud-Services (Autoren: Ehrenberg-Silies, S., Compagna, D., Schwetje, O., Bovenschulte, M.). TAB-Horizon-Scanning Nr. 1, Berlin

TAB (2014c): Inwertsetzung von Biodiversität (Autor: Kehl, C., unter Mitarbeit von Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 161, Berlin

TAB (2015a): Weiße Biotechnologie – Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie: Verfahren, Anwendungen, ökonomische Perspektiven. Innovationsanalyse, Teil I (Autoren: Aichinger, H., Hüsing, B., Wydra, S.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 168 (in Vorbereitung), Berlin

TAB (2015b): Weiße Biotechnologie – Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie: Umwelt- und Nachhaltigkeitspotenziale. Innovationsanalyse, Teil II (Autoren: Schiller, J., Aicher, C., Feresin, E., unter Mitarbeit von Klauer, B., Hansjürgens, B., Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 169 (in Vorbereitung), Berlin

TAB (2015c): Das Konzept »Responsible Research and Innovation« und dessen Relevanz für die deutsche Forschungs-, Technologie- und Innovationspolitik. TA-Vorstudie (Autoren: Lindner, R., Schröder, T., Goos, K., Güth, S., Som, O.). TAB-Hintergrundpapier Nr. 23 (in Vorbereitung), Berlin

Tabone, M.D., Cregg, J.J., Beckman, E.J., Landis, A.E. (2010): Sustainability metrics: life cycle assessment and green design in polymers. In: Environmental Science and Technology 44(21), S. 8264–8269

Tang, W.L., Zhao, H. (2009): Industrial biotechnology: Tools and applications. In: Biotechnology Journal 4(12), S. 1725–1739

Tang, X., Tan, Y., Zhu, H., Zhao, K., Shen, W. (2009): Microbial conversion of glycerol to 1,3-propanediol by an engineered strain of Escherichia coli. In: Applied and Environmental Microbiology 75(6), S. 1628–1634

Tavassoli, A., Lu, Q., Gam, J., Pan, H., Benkovic, S.J., Cohen, S.N. (2008): Inhibition of HIV budding by a genetically selected cyclic peptide targeting the Gag-TSG101 interaction. In: ACS Chemical Biology 3(12), S. 757–764

Technopolis Group, F.A.Z.-Institut (2014): Workshopreihe mit begleitender Studie zur Technologieaufgeschlossenheit und Innovationsfreundlichkeit der Gesellschaft in Deutschland. o. O.

Testbiotech (e. V.) (2010a): Synthetische Biologie. Teil 1: Synthetische Biologie und künstliches Leben – Eine kritische Analyse (Autoren: Then, C., Hamberger, S.). München

Testbiotech (2010b): Synthetische Biologie und künstliches Leben – eine kritische Analyse. Teil 2: Die Erzeugung und Nutzung von Biokraftstoffen der zweiten Generation (»Synthi-Fuels«) (Autoren: Then, C., Potthof, C., Hamberger, S.). München

Then, C. (2015): Synthetische Gentechnik und ihre Anwendung bei Pflanzen und Tieren in der Landwirtschaft. Testbiotech Basis-Text 22-1-2015, München

Thyer, R., Ellefson, J. (2014): Synthetic biology: New letters for life's alphabet. In: Nature 509(7500), S. 291–292

Tiku, N. (2014): Male startup founders think your vagina should smell like a ripe peach. In: Valleywag, 19.11.2014, http://valleywag.gawker.com/male-startup-founders-think-your-vagina-should-smell-li-1660896761 (23.11.2015)

TMF (Technologie- und Methodenplattform für die vernetzte medizinische Forschung e. V.), Nationale Forschungsplattform für Zoonosen (2014): Stellungnahme der Nationalen Forschungsplattform für Zoonosen und der AG Zoonosen und Infektionsforschung (AG ZI) der TMF – Technologie- und Methodenplattform für die vernetzte medizinische Forschung e. V. zu den Empfehlungen des Deutschen Ethikrats zum Thema »Biosicherheit – Freiheit und Verantwortung in der Wissenschaft«. 17.11.2104, Berlin, www.zoonosen.net/News/articleType/ArticleView/articleId/1639.aspx (23.11.2015)

Topp, S., Gallivan, J.P. (2007): Guiding bacteria with small molecules and RNA. In: Journal of the American Chemical Society 129(21), S. 6807–6811

Torgersen, H. (2009): Synthetic biology in society: Learning from past experience? In: Systems and Synthetic Biology 3(1–4), S. 9–17

Torgersen, H. (2013): TA als hermeneutische Unternehmung. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 22(2), S. 75–80

Torgersen, H., Schmidt, M. (2012): Perspektiven der Kommunikation für die Synthetische Biologie. In: Weitze, M.-D., Pühler, A., Heckl, W.M., Müller-Röber, B., Renn, O., Weingart, P., Wess, G. (Hg.): Biotechnologie-Kommunikation. Kontroversen, Analysen, Aktivitäten. Heidelberg/Berlin, S. 113–154

Torgersen, H., Schmidt, M. (2013): Frames and comparators: How might a debate on synthetic biology evolve? In: Futures 48, S. 44–54

Trang, P.T., Berg, M., Viet, P.H., Van Mui, N., Meer. J.R. van der (2005): Bacterial bioassay for rapid and accurate analysis of arsenic in highly variable groundwater samples. In: Environmental Science and Technology 39(19), S. 7625–7630

transGEN (Forum Bio- und Gentechnologie – Verein zur Förderung der gesellschaftlichen Diskussionskultur e. V.) (2015a): Der Bioethanol-Mais. www.transgen.de/forschung/1008.gentechnik-mais-bioethanol.html (23.11.2015)

transGEN (2015b): Gentechnisch veränderte Insekten: Verdrängung unerwünschter Artgenossen. www.transgen.de/tiere/1509.gentechnisch-veraenderte-insekten-verdraengung-unerwuenschter-artgenossen.html (23.11.2015)

transGEN (2015c): Neue Züchtungstechniken: Was eine Pflanze zu einer gentechnisch veränderten macht. www.transgen.de/aktuell/1549.neue-zuechtungstechniken-regulierung.html (23.11.2015)

transGEN (2015d): Teller versus Tank: Mehr Energieeffizienz durch Züchtung? www.transgen.de/forschung/1511.pappel-nachwachsender-rohstoff.html (23.11.2015)

Trimbur, D.E., Im, C-S., Dillon, H.F., Day, A.G., Franklin, S., Coragliotti, A. (2010): Production of oil in microorganisms. US Patentanmeldung US 2010/0323413 A1, 23.12.2010, www.google.com/patents/US20100323413 (25.11.2015)

Trinh, C.T., Srienc, F. (2009): Metabolic engineering of Escheria coli for efficient conversion of glycerol to ethanol. In: Applied and Environmental Microbiology 75(21), S. 6696–6705

Trögl, J., Chauhan, A., Ripp, S., Layton, A.C., Kuncová, G., Sayler, G.S. (2012): Pseudomonas fluorescens HK44: Lessons learned from a model whole-cell bioreporter with a broad application history. In: Sensors 12(2), S. 1544–1571

Tucker, J.B. (2010): Seeking biosecurity without verification: The new U.S. strategy on biothreats. In: Arms Control Today, 14.01.2010, S. 8–14, www.armscontrol.org/act/2010_01-02/Tucker (23.11.2015)

Tucker, J.B. (2011): Could terrorists exploit synthetic biology? In: The New Atlantis 31, S. 69–81

Tumpey, T.M., Basler, C.F., Aguilar, P.V., Zeng, H., Solorzano, A., Swayne, D.E., Cox, N.J., Katz, J.M., Taubenberger, J.K., Palese, P., Garcia-Sastre, A. (2005): Characterization of the reconstructed 1918 Spanish influenza pandemic virus. In: Science 310(5745), S. 77–80

Turney, J., Attwood, R. (2011): Democratic experiments. In: The Times Higher Education Supplement 2023, 3.11.2011, S. 40, www.timeshighereducation.co.uk/features/democratic-experiments/417989.article (23.11.2015)

UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group (2012): A synthetic biology roadmap for the UK. o. O., www.rcuk.ac.uk/RCUK-prod/assets/documents/publications/SyntheticBiologyRoadmap.pdf (23.11.2015)

UNEP (The United Nations Environment Programme) (2007): Global environment outlook 4. Valetta, www.unep.org/geo/geo4.asp (23.11.2015)

UNICRI (United Nations Interregional Crime and Justice Research Institute) (2012): Security implications of synthetic biology and nanobiotechnology. A risk and response assessment of advances in biotechnology. Shortened public version, Turin, www.unicri.it/in_focus/files/UNICRI%202012 %20Security%20Implications%20of%20Synthetic%20Biology%20and%20Nanobiotechnology%20Final%20Public-1.pdf (23.11.2015)

United States Government (2012): United States Government policy for oversight of life sciences dual use research of concern. o. O., www.phe.gov/s3/dualuse/Documents/us-policy-durc-032812.pdf (23.11.2015)

United States Government (2014): United States Government policy for oversight of life sciences dual use research of concern. o. O., www.phe.gov/s3/dualuse/Documents/durc-policy.pdf (23.11.2015)

Urnov, F.D., Rebar, E.J., Holmes, M.C., Zhang, H.S., Gregory, P.D. (2010): Genome editing with engineered zinc finger nucleases. In: Nature Reviews Genetics 11(9), S. 636–646

Valls, M., Atrian, S., Lorenzo, V. de, Fernandez, L.A. (2000): Engineering a mouse metallothionein on the cell surface of Ralstonia eutropha CH34 for immobilization of heavy metals in soil. In: Nature Biotechnology 18(6), S. 661–665

VCI (Verband der Chemischen Industrie e. V.) (2015): Chemiewirtschaft in Zahlen 2015. Frankfurt a.M., www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chemiewirtschaft-in-zahlen-print.pdf (23.11.2015)

Veciana, S., Neubauer, C. (2015): Bottom-Up Geschichten nachhaltigkeitsorientierter partizipativer Forschung. Eine partizipative Studie. Vereinigung Deutscher Wissenschaftler e. V., Berlin, www.research-arts.net/download/PartizipativeForschung_Veciana-Neubauer_2015.pdf (23.11.2015)

Venter, C.J. (2014): IB interview. A conversation with J. Craig Venter, PhD. In: Industrial Biotechnology 10(1), S. 7–10

Verma, I.M., Somia, N. (1997): Gene therapy – promises, problems and prospects. In: Nature 389(6648), S. 239–242

Verma, I.M., Weitzman, M.D. (2005): Gene therapy: Twenty-first century medicine. In: Annual Review of Biochemistry (74), S. 711–738

Virginia, G. (2013): Biotechnology: Independent streak. In: Nature 499(7459), S. 509–511

Vogel, G. (2015): Embryo engineering alarm. In: Science 347(6228), S. 1301

Vöneky, S. (2014): Ethikrat: Ohne Gesetze geht es nicht. Interview mit Silja Vöneky. In: Gen-ethischer Informationsdienst (GID) 225, S. 8–11

Wackett, L.P. (2011): Engineering microbes to produce biofuels. In: Current Opinion in Biotechnology 22(3), S. 388–93

Wagner, T. (2013): Gen-Spritze aus Kugelschreibern. In: Deutschlandradio Kultur Radiofeuilleton – Wissenschaft und Technik, 27.07.2013, www.deutschlandradio-kultur.de/gen-spritze-aus-kugelschreibern.1067.de.html?dram:article_id=255482 (23.11.2015)

Wakeford, T., Haq, J. (2010): Artificial life: Let the people decide. In: New Scientist 206(2766), S. 26–27

Walker, T., Johnson, P.H., Moreira, L.A., Iturbe-Ormaetxe, I., Frentiu, F.D., McMeniman, C.J., Leong, Y.S., Dong, Y., Axford, J., Kriesner, P., Lloyd, A.L. et al. (2011): The wMel Wolbachia strain blocks dengue and invades caged Aedes aegypti populations. In: Nature 476(7361), S. 450–453

Waltz, E. (2009): Under wraps. In: Nature Biotechnology 27(10), S. 880–882

Wang, H.H., Isaacs, F.J., Carr, P.A., Sun, Z.Z., Xu, G., Forest, C.R., Church, G.M. (2009): Programming cells by multiplex genome engineering and accelerated evolution. In: Nature 460(7257), S. 894–898

Wang, K., Neumann, H., Peak-Chew, S.Y., Chin, J.W. (2007): Evolved orthogonal ribosomes enhance the efficiency of synthetic genetic code expansion. In: Nature Biotechnology 25(7), S. 770–777

Warrick, J. (2010): FBI investigation of 2001 anthrax attacks concluded; U.S. releases details. In: The Washington Post, 20.02.2010, www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2010/02/19/AR2010021902369.html?sid=ST2010021904257 (23.11.2015)

Watanabe, M.E. (2001): Can bioremediation bounce back? In: Nature Biotechnology 19(12), S. 1111–1115

Watanabe, T., Zhong, G., Russell, C.A., Nakajima, N., Hatta, M., Hanson, A., McBride, R., Burke, D.F., Takahashi, K., Fukuyama, S., Tomita, Y. et al. (2014): Circulating avian influenza viruses closely related to the 1918 virus have pandemic potential. In: Cell Host and Microbe 15(6), S. 692–705

Weber, W., Fussenegger, M. (2012): Emerging biomedical applications of synthetic biology. In: Nature Reviews Genetics 13(1), S. 21–35

Weber, W., Schoenmakers, R., Keller, B., Gitzinger, M., Grau, T., Daoud-El Baba, M., Sander, P., Fussenegger, M. (2008): A synthetic mammalian gene circuit reveals antituberculosis compounds. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 105(29), S. 9994–9998

WEF (The World Economic Forum) (2014): Global risks 2014. Insight report. 9th Edition, Genf, www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalRisks_Report_2014.pdf (23.11.2015)

WEF (2015): Global risks 2015. Insight report. 10th Edition, Genf, www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_2015_Report15.pdf (23.11.2015)

Weitze, M.-D., Ohlendorf, J.G. (2011): Synthetische Biologie bei acatech: Vorbereitende, begleitende und nachbereitende Kommunikation. In: Pühler et al. 2011, S. 141–150

Weizsäcker, C. von, Weizsäcker, E.U. von (1984): Fehlerfreundlichkeit. In: Kornwachs, K. (Hg.): Offenheit – Zeitlichkeit – Komplexität. Zur Theorie der Offenen Systeme. Frankfurt/New York, S. 167–201

Westfall, P.J., Gardner, T.S. (2011): Industrial fermentation of renewable diesel fuels. In: Current Opinion in Biotechnology 22(3), S. 344–350

Whaley, S.R., English, D.S., Hu, E.L., Barbara, P.F., Belcher, A.M. (2000): Selection of peptides with semiconductor binding specificity for directed nanocrystal assembly. In: Nature 405(6787), S. 665–668

WHO (World Health Organization) (2012): Report on technical consultation on H5N1 research issues. Genf, www.who.int/influenza/human_animal_interface/mtg_report_h5n1.pdf (23.11.2015)

Wickson, F., Carew, A.L. (2014): Quality criteria and indicators for responsible research and innovation: Learning from transdisciplinarity. In: Journal of Responsible Innovation 1(3), S. 254–273

Widmaier, D.M., Tullman-Ercek, D., Mirsky, E.A., Hill, R., Govindarajan, S., Minshull, J., Voigt, C.A. (2009): Engineering the Salmonella type III secretion system to export spider silk monomers. In: Molecular Systems Biology 5, S. 309

Wieland, T. (2011): Neue Technik auf alten Pfaden. Biotechnologieförderung in der Bundesrepublik Deutschland. In: Kehrt, C., Schüßler, P., Weitze, M.-D. (Hg.): Neue Technologien in der Gesellschaft. Akteure, Erwartungen, Kontroversen und Konjunkturen. Bielefeld, S. 249–263

Willets, D. (2013): Eight great technologies. London

Williams, H.L. (2013): Intellectual property rights and innovation: Evidence from the human genome. In: Journal of Political Economy 121(1), S. 1–27

Wimmer, E.A. (2005): Eco-friendly insect management. In: Nature Biotechnology 23(4), S. 432–433

Wimmer, E., Mueller, S., Tumpey, T.M., Taubenberger, J.K. (2009): Synthetic viruses: A new opportunity to understand and prevent viral disease. In: Nature Biotechnology 27(12), S. 1163–1172

Wimmer, E., Paul, A.V. (2011): Synthetic poliovirus and other designer viruses: What have we learned from them? In: Annual Review of Microbiology 65, S. 583–609

Windbichler, N., Menichelli, M., Papathanos, P.A., Thyme, S.B., Li, H., Ulge, U.Y., Hovde, B.T., Baker, D., Monnat, R.J.Jr., Burt, A., Crisanti, A. (2011): A synthetic homing endonuclease-based gene drive system in the human malaria mosquito. In: Nature 473(7346), S. 212–215

Wise de Valdez, M.R., Nimmo, D., Betz, J., Gong, H.F., James, A.A., Alphey, L., Black, W.C.4th (2011): Genetic elimination of dengue vector mosquitoes. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 108(12), S. 4772–4775

Withers, S.T., Gottlieb, S.S., Lieu, B., Newman, J.D., Keasling, J.D. (2007): Identification of isopentenol biosynthetic genes from Bacillus subtilis by a screening method based on isoprenoid precursor toxicity. In: Applied and Environmental Microbiology 73(19), S. 6277–6283

Wolinetz, C.D. (2012): Implementing the new U.S. dual-use policy. In: Science 336(6088), S. 1525–1527

WWICS (Woodrow Wilson International Center for Scholars) (2010): Trends in synthetic biology research funding in the United States and Europe. Synthetic Biology Project, Research Brief 1. June 2010, www.synbioproject.org/process/assets/files/6420/final_synbio_funding_web2.pdf (23.11.2015)

WWICS (2011): Comprehensive environmental assessment and synthetic biology applications workshop. The Woodrow Wilson International Center for Scholars, Science, Technology & Innovation Program, July 28th. Conference Notes version 1.0 prepared August 2, 2011. Washington, D.C., www.synbioproject.org/site/assets/files/1266/final_cea_and_syn_bio_workshop_notes_wilson_center.pdf (23.11.2015)

Xiang, S., Fruehauf, J., Li, C.J. (2006): Short hairpin RNA-expressing bacteria elicit RNA interference in mammals. In: Nature Biotechnology 24(6), S. 697–702

Xie, Z., Wroblewska, L., Prochazka, L., Weiss, R., Benenson, Y. (2011): Multi-input RNAi-based logic circuit for identification of specific cancer cells. In: Science 333(6047), S. 1307–1311

Ye, H., Charpin-El Hamri, G., Zwicky, K., Christen, M., Folcher, M., Fussenegger, M. (2013): Pharmaceutically controlled designer circuit for the treatment of the metabolic syndrome. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 110(1), S. 141–146

Ye, H., Daoud-El Baba, M., Peng, R.W., Fussenegger, M. (2011): A synthetic optogenetic transcription device enhances blood-glucose homeostasis in mice. In: Science 332(6037), S. 1565–1568

Yim, H., Haselbeck, R., Niu, W., Pujol-Baxley, C., Burgard, A., Boldt, J., Khandurina, J., Trawick, J.D., Osterhout, R.E., Stephen, R., Estadilla, J. et al. (2011): Metabolic engineering of Escherichia coli for direct production of 1,4-butanediol. In: Nature Chemical Biology 7(7), S. 445–452

Yomano, L.P., Yorks, S.W., Shanmugam, K.T., Ingram, L.O. (2009): Deletion of methylglyoxal synthase gene (mgsA) increased sugar co-metabolism in ethanol-producing Escherichia coli. In: Biotechnology Letters 31(9), S. 1389–1398

Young, E., Alper, H. (2010): Synthetic biology: Tools to design, build, and optimize cellular processes. In: Journal of Biomedicine & Biotechnology (2010), S. 130781

Yu, J., Chen, L.X. (2008): The greenhouse gas emissions and fossil energy requirement of bioplastics from cradle to gate of a biomass refinery. In: Environment Science and Technology 42(18), S. 6961–6966

Zhang, F., Carothers, J.M., Keasling, J.D. (2012): Design of a dynamic sensor-regulator system for production of chemicals and fuels derived from fatty acids. In: Nature Biotechnology 30(4), S. 354–359

Zhang, J.Y., Marris, C., Rose, N. (2011): The transnational governance of synthetic biology. Scientific uncertainty, cross-borderness and the »art« of governance. BIOS working paper 4, BIOS, London School of Economics and Political Sciene, London

Zhang, K., Sawaya, M.R., Eisenberg, D.S., Liao, J.C. (2008): Expanding metabolism for biosynthesis of nonnatural alcohols. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 105(52), S. 20653–20658

Zhou, S., Yomano, L.P., Shanmugam, K.T., Ingram, L.O. (2005): Fermentation of 10 % (w/v) sugar to D: (-)-lactate by engineered Escherichia coli B. In: Biotechnology Letters 27(23–24), S. 1891–1896

Ziegler, D., Pettibone, L., Rettberg, W., Feldman, R., Brand, M., Schumann, A., Kiefer, S. (2015): Beispiel: Citizen-Science-Projekte. Potenzial für Lebenslanges Lernen. In: Weiterbildung 2, S. 18–21

Zimmeren, E. van, Vanneste, S., Matthijs, G., Vanhaverbeke, W., Overwalle, G. van (2011): Patent pools and clearinghouses in the life sciences. In: Trends in Biotechnology 29(11), S. 569–576

ZKBS (Zentrale Kommission für biologische Sicherheit) (2001): Stellungnahme der ZKBS zur Bewertung des »Blue Genes«-Experimentierkastens des Fonds der Chemischen Industrie vom 19. September 2001. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL), Az.: 6790-10-72-0001, o. O., www.bvl.bund.de (23.11.2015)

ZKBS (2012a): Monitoring der Synthetischen Biologie in Deutschland. 1. Zwischenbericht der Zentralen Kommission für die Biologische Sicherheit vom 06. November 2012. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL), Az.: 46012, o. O., www.bvl.bund.de (23.11.2015)

ZKBS (2012b): Position statement of the ZKBS on new plant breeding techniques. June 2012. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL), Ref. No. 402.45310.0104, o. O., www.bvl.bund.de (23.11.2015)

ZKBS (2012c): Stellungnahme der ZKBS zur Risikobewertung des ARSOlux-Test-Systems. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL), Az.: 402.45310.0105, o. O., www.bvl.bund.de (23.11.2015)

Zwart, H., Landeweerd, L., Rooij, A. van (2014): Adapt or perish? Assessing the recent shift in the European research funding arena from »ELSA« to »RRI«. In: Life Sciences, Society and Policy 10(11), www.ru.nl/publish/pages/685620/elsa-rri.pdf (23.11.2015)

# ANHANG

## Tabellenverzeichnis 1.



## Abbildungsverzeichnis 2.

## Abkürzungsverzeichnis 3.

| | |
|---|---|
| ABFTA | Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung |
| BBF | BioBricks Foundation |
| BBSRC | Biotechnology and Biological Sciences Research Council |
| BiOS | Biological-Open-Source-System |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMEL | Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft |
| BMUB | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit |
| BTWC | Biological and Toxin Weapons Convention |
| BUND | Bund für Umwelt und Naturschutz e. V. |
| BVL | Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit |
| COGEM | Commissie Genetische Modificatie |
| CRISPR | clustered regularly interspaced short palindromic repeats |
| CWC | Chemical Weapons Convention |
| DFG | Deutsche Forschungsgemeinschaft e. V. |
| DIY | do it yourself |
| DNA | deoxyribonucleic acid (Desoxyribonukleinsäure) |
| DURC | dual use research of concern |
| E. coli | Escherichia coli (Bakterium) |
| EFSA | European Food Safety Authority |
| EGE | European Group on Ethics in Science and New Technologies |
| ELSI | ethical, legal, and societal implications |
| EPSRC | Engineering and Physical Sciences Council |
| EPTA | European Parliamentary Technology Assessment Network |
| ERASynBio | European Research Network for the development and coordination of synthetic biology in Europe |
| ESF | European Science Foundation |
| ETC Group | Action Group on Erosion, Technology and Concentration |
| EU | Europäische Union |
| FBI | Federal Bureau of Investigation |
| FuE | Forschung und Entwicklung |
| GeN | Gen-ethisches Netzwerk e. V. |
| GenTG | Gesetz zur Regelung der Gentechnik (Gentechnikgesetz) |
| GVMO | gentechnisch veränderter Mikroorganismus |
| GVO | gentechnisch veränderter Organismen |
| GVP | gentechnisch veränderte Pflanze |
| i. e. S. | im engeren Sinne |
| i. w. S. | im weiteren Sinne |
| IASB | International Association Synthetic Biology e. V. |
| iGEM | International Genetically Engineered Machine Competition |

| | |
|---|---|
| IGSC | International Gene Synthesis Consortium |
| ITAS | Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse des Karlsruher Instituts für Technologie |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |
| MMLAP | Mobilisation and Mutual Learning Action Plan |
| MPG | Max-Planck-Gesellschaft e. V. |
| NEST | new and emerging science and technology |
| NRO | Nichtregierungsorganisation |
| NSF | National Science Foundation |
| NTWG | New Techniques Working Group |
| PCR | polymerase chain reaction |
| PCSBI | Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues |
| RNA | ribonucleic acid/Ribonukleinsäure |
| RRI | responsible research and innovation |
| SCENIHR | Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks |
| STOA | Scientific Foresight Unit (vormals: Science and Technology Options Assessment) des Europäischen Parlaments |
| SVMO | synthetisch veränderte Mikroorganismen |
| SVO | synthetisch veränderter Organismus |
| SYBHEL | Synthetic Biology for Human Health |
| Synbio | synthetische Biologie |
| TA | Technikfolgenabschätzung |
| TAB | Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag |
| TALEN | transcription activator-like effector nuclease |
| UFZ | Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung |
| WHO | World Health Organization |
| WWICS | Woodrow Wilson International Center for Scholars |
| XNA | xeno nucleic acid/Xenonukleinsäure |
| ZFN | Zinkfingernuklease |
| ZKBS | Zentrale Kommission für Biologische Sicherheit des BVL |



Satz: Satzweiss.com Print, Web, Software GmbH, Mainzer Straße 116, 66121 Saarbrücken, www.satzweiss.com
Druck: Printsystem GmbH, Schafwäsche 1-3, 71296 Heimsheim, www.printsystem.de
Vertrieb: Bundesanzeiger Verlag GmbH, Postfach 10 05 34, 50445 Köln, Telefon (02 21) 97 66 83 40, Fax (02 21) 97 66 83 44, www.betrifft-gesetze.de
ISSN 0722-8333